

# 国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of  
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.883

March 2016

## 水循環解析に関する技術資料

～ 地表水と地下水の一体的な解析に向けて ～

西村宗倫・川崎将生

Technical note on basin-wide water cycle analysis

～ For combined analysis of surface water and groundwater ～

Sorin NISHIMURA and Masaki KAWASAKI

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management  
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

## 水循環解析に関する技術資料

西村 宗倫\*  
川崎 将生\*\*

### Technical note on basin-wide water cycle analysis

Sorin NISHIMURA\*  
Masaki KAWASAKI\*\*

#### 概要

本書は、流域の水循環の状態を把握するとともに、水循環の健全化や持続可能な地下水の利用と保全の取り組みを評価するための定量的な情報を得るツールとなる、地表水と地下水を一体的に解析する水循環解析を行う上で、有用な情報や考え方を技術図書にとりまとめたものである。

キーワード : 水循環解析、地下水

#### Synopsis

This report is made up contents of the useful information and way of thinking for water cycle analysis, which is the combined analysis of surface water and groundwater. It is expected as technology, by which we get quantitative information for the purpose of evaluating a policy for sound water cycle or sustainable use and conservation of underground water.

Key Words : water cycle analysis, groundwater

---

\* 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 水循環研究室 主任研究官  
Senior Researcher, Water Cycle Division, River Department, NILIM

\*\* 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 水循環研究室 室長  
Head, Water Cycle Division, River Department, NILIM

# 目次

<b>1章</b>	<b>はじめに</b> .....	<b>1</b>
1節	本書の目的 .....	1
2節	本書の構成 .....	3
<b>2章</b>	<b>水循環解析の基礎</b> .....	<b>4</b>
1節	水循環解析の定義 .....	4
2節	水循環解析の目的 .....	6
3節	水循環解析に用いる資料 .....	7
4節	水循環解析の精度 .....	11
<b>3章</b>	<b>水循環解析の流れ</b> .....	<b>12</b>
<b>4章</b>	<b>水循環解析の諸元の設定</b> .....	<b>14</b>
1節	水循環解析の対象エリアの設定 .....	14
2節	水循環解析の解析期間の設定 .....	16
3節	水循環解析の解析ケースの設定 .....	17
<b>5章</b>	<b>水循環解析モデルの構築</b> .....	<b>18</b>
1節	水循環解析モデルの選定 .....	18
2節	水循環解析モデルの設定 .....	19
1)	メッシュの設定 .....	19
2)	境界条件の設定 .....	20
3)	各水文プロセスにおける入力データの設定 .....	22
3節	水循環解析モデルの再現解析 .....	28
1)	パラメータのチューニング .....	28
2)	再現解析 .....	29
<b>6章</b>	<b>水循環解析結果の整理・活用</b> .....	<b>32</b>
1節	水循環解析の出力結果の整理 .....	32
1)	水収支 .....	32

2) 地下水位等高線図	33
3) 流線軌跡図・流線ベクトル図	33
2節 水循環解析による施策評価	34
1) 水田湛水・地下水涵養池	34
2) 地下水揚水規制	35
<b>7章 おわりに</b>	<b>36</b>

<参考資料>

- 1) 水循環解析事例
- 2) 参考文献

## 1章 はじめに

### 1章 1節 本書の目的

水循環基本法（平成 26 年法律第 16 号）が成立した。同法では、図 1 の水循環の概念図に示すとおり、「水循環」とは、水が、蒸発、降下、流下又は浸透により、海域等に至る過程で、地表水又は地下水として河川の流域を中心に循環することと定義され、地方公共団体は、水循環に関する施策に関し、その地域の特性に応じた施策を策定し、及び実施する責務を有するものと定められた。

今後、地方公共団体等において、水循環の健全化や、それに資する持続可能な地下水の利用と保全のための取組に係る検討・評価が進められることとなるが、その際、河川流域もしくは狭窄部の上流域等を対象とし、地表水モデルと地下水モデルを基幹として、降雨、融雪、蒸発散、表面流出、地下浸透、地下水流動、河道流、地下水揚水、及び河川水と地下水の水交換などの水文プロセスを組み合わせ、一体的かつ広域的に解析を行う「水循環解析」は、この検討・評価の基盤情報を得るための極めて有用な手段であり、その使用頻度が高まるものと考えられる。

これまで地表水分野においては、河川流域や狭窄部の上流域等を対象とした広域的な解析は頻繁に行われているが、水循環基本法の制定を踏まえ、今後は、地下水も含み、地表水と地下水を一体的・広域的に解析することが更に必要となるものと考えられる。

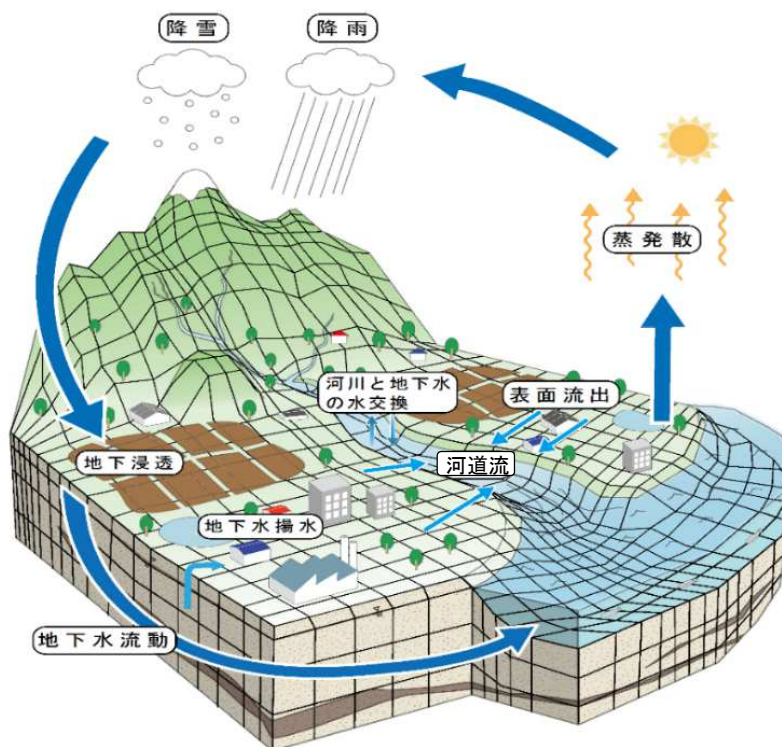


図 1 水循環の概念図

そこで本書は、地方公共団体等の職員が、地下水を主眼において、水循環解析を行おうとする際に参考に出来る技術資料とすることを目的として、水循環解析を行う上で有用となる情報や考え方を、水循環解析のケーススタディ<sup>1)、2)</sup>をもとに整理したものである。

ただし、現状では水循環解析事例が必ずしも多くない。したがって、水循環解析に係る情報や考え方は、本書に記載した内容が全てではないことに留意されたい。特に、水循環解析の対象となる流域の地形・地質が複雑な場合や、2章3節で述べるモデルを設定するために必要な資料が十分には入手出来なかった場合など、水循環解析に期待する精度が得られない場合があることに留意する必要がある。

なお、水循環解析計算を実施するためには、使用する解析モデルの数値解析法（有限差分法や有限要素法）を理解すること、さらには、そのモデルが組み込まれたソフトウェアに習熟する必要があるが、本書では割愛している。このような情報が必要になった場合は、適宜、専門書<sup>3)</sup>やソフトウェアのドキュメント等を参考にされたい。

## 1章 2節 本書の構成

本書は、1章1節～2節、7章を除き、冒頭に四角囲いで基本的事項を記し、その下に解説を記した。

## 2章 水循環解析の基礎

### 2章 1節 水循環解析の定義

水循環解析とは、河川流域もしくは狭窄部の上流域等を対象とし、降雨、融雪、蒸発散、表面流出、地下浸透、地下水流動、河道流、地下水揚水、及び河川水と地下水の水交換などの水文プロセスを、地表水モデル・地下水モデルを基幹とした解析モデルに反映し、一体的かつ広域的に解析を行うことである。

#### <解説>

水循環基本法においては、「水循環」とは、水が、蒸発、降下、流下又は浸透により、海域等に至る過程で、地表水又は地下水として河川の流域を中心に循環することと定義されている。

現在、水循環解析という言葉に必ずしも定まった定義はないが、本書においては、水循環基本法に基づく水循環の定義を参考にし、水循環解析とは、河川流域もしくは狭窄部の上流域等を対象とし、降雨、融雪、蒸発散、表面流出、地下浸透、地下水流動、河川、地下水揚水、及び河川水と地下水の水交換などの水文プロセスを、地表水モデル・地下水モデルを基幹とした解析モデルに反映し、一体的かつ広域的に解析を行うことと定義する。近年、計算機的能力向上とも相まって、この定義に合致するモデルが開発されている<sup>4)</sup>。

この水循環解析は、図2に水循環解析モデルの概念図に示すとおり、地形関係、

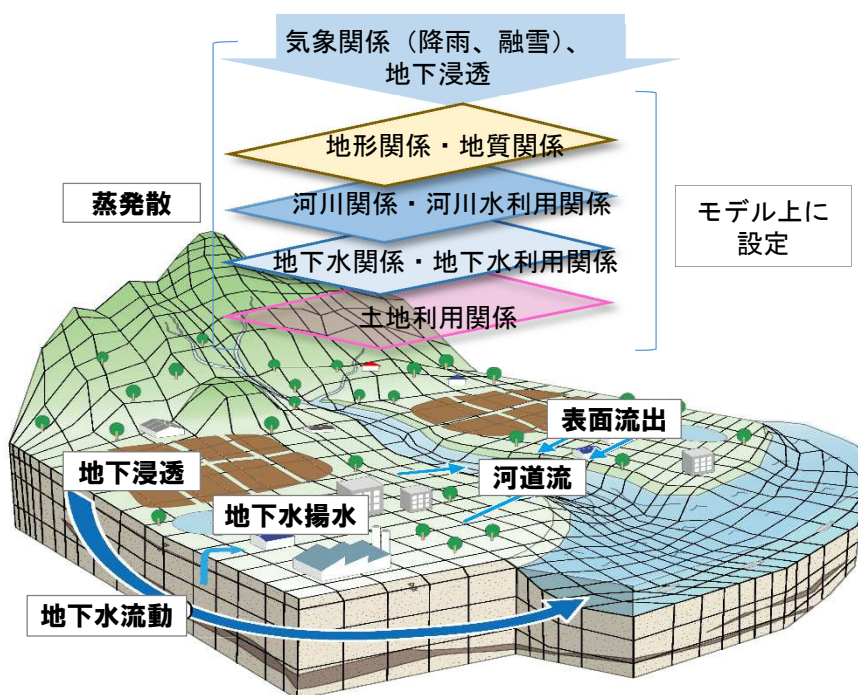


図2 水循環解析モデルの概念図



地質関係、河川関係、河川水利用関係、地下水関係、地下水利用関係、土地利用関係の情報をモデル上に設定し、これに、降雨、融雪、地下浸透、蒸発散をタンクモデルでモデル化し、地表水モデルと地下水モデルへ入力することで解析している<sup>5)</sup>。近年は、これらの水文プロセスも水循環解析モデルに組み込み、一体として地表水と地下水の流れを計算する水循環解析モデルも開発されている<sup>4)</sup>。

## 2章 2節 水循環解析の目的

水循環解析を実施するには様々な目的が考えられ、対象エリアにおける水収支や地下水位等の水循環に関する「基礎的な情報」を得ることのほか、地下水の流れの「視覚的情報」を得ること、さらには、地下水の涵養や地下水の揚水規制等の「施策評価の根拠となる情報」を得ることなどが挙げられる。

### <解説>

水循環解析の目的例を表1に示す。

「基礎的な情報」は、離散的な観測情報を補完して得られる流域の面的な地下水位の分布や変動、水収支等の情報である。「視覚的な情報」は、流線軌跡図や地下水流向流速ベクトル図等、通常見えない地下水の流動等を可視化した情報である。

「施策評価の根拠となる情報」は、例えば、地下水の涵養策を行った場合や地下水の揚水規制を行った場合のシナリオを設定し、with/withoutでの解析結果を比較した情報である。

表1 水循環解析の目的例

解析の目的		概要
基礎的な情報の取得		<ul style="list-style-type: none"> <li>離散的な流域情報を水循環解析により補完し、地下水位、河川流量、地下水流動、水収支などの情報を得る。</li> </ul>
視覚的な情報の取得		<ul style="list-style-type: none"> <li>解析結果を用いて、地下水の流線軌跡図や流向・流速ベクトル図等を作成し、地下水流動の状態を可視化する。</li> </ul>
施策評価の根拠となる情報の取得		<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水の涵養策等を行った場合のシナリオを水循環解析モデルへ設定し、with/withoutで解析結果を比較する。</li> <li>得られた情報は、施策を実施するか否かの判断のほか、合意形成を図るための資料として活用する。</li> </ul>
その他	感度解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>水循環解析モデルの水文地質構造や透水性などのパラメータを変更することにより、対象エリアの水文地質特性や水循環特性を把握する。</li> </ul>
	将来予測	<ul style="list-style-type: none"> <li>気候変動モデルの出力結果等を水循環解析モデルへ設定し、将来の水循環を予測する。</li> </ul>

\* 「4章 3節 水循環解析の解析ケースの設定」を参照

## 2章 3節 水循環解析に用いる資料

水循環解析に一般的に用いられる資料は、モデルの構築では気象関係、地形関係、地質関係、河川関係、河川水利用関係、地下水関係、地下水利用関係、土地利用関係等がある。また、水循環解析で施策評価等を行う場合は、その評価対象に関する資料も必要となる。

### <解説>

以下に、水循環解析モデルの構築に一般に用いることが想定される「対象エリア」に関する資料について示す。また、表2に、これらの具体的な資料名および入手先、モデル構築における主な用途を示す。

#### 1) 気象関係

水循環解析では、雨量データが必要となる。これには、気象庁アメダス雨量データ、国土交通省水文水質データベースのテレメータ雨量データ等が使用できる。また、蒸発散量等の算出のための気温データ、積雪地域においては融雪量を考慮するための積雪深データ等も上記データベース等から収集する必要がある。山地等の高標高域では解析雨量データが使用できる。

#### 2) 地形関係

水循環解析では、山地の尾根や谷、河川などの地形が地下水流動の形成に影響することから、地形形態の再現性を高めたモデルを構築できる地形データが必要となる。これには、国土地理院の1/25,000地形図(10mメッシュDEM)が使用できる。さらに、河道や湧水等の地形を詳細に再現する必要がある場合には、レーザープロファイラーにより測定されている詳細な地形データ(1mメッシュ程度のDEM)や都市計画図の1/2,500の地形等高線や河道縦断・横断図などを収集し用いるが、これらの資料がない場合には、現地踏査により川幅や河床高さの測定を行うことが望ましい。また、対象エリアが海に面する場合には海底地形も必要となる場合があり、1/50,000の沿岸海底地形図などを用いる。

#### 3) 地質関係

水循環解析では、地質構造のデータが必要となる。これには、表層地質データである(国研)産業技術総合研究所の20万分の1のシームレス地質図が使用できる。また、地方公共団体や学会による土木地質図や地盤図、土壌分布図などを利用できる場合もある。

#### 4) 河川関係

水循環解析では、再現性の検討に河川流量データを用いる。一般的には、国土交通省水文水質データベースの観測データが使用できる。また、ダム流入量・放流量を使用して、ダムによる貯留・補給をモデル化する場合や、河川流量とみなして利用する場合は、これらのデータをダム管理者等から収集する場合もある。

#### 5) 河川水利用関係

水循環解析では、河川からの取水量等に関するデータが必要となる。一般的には、河川の利水系統図や河川取水量を、国や地方公共団体等の関係部局から収集する。

#### 6) 地下水関係

水循環解析では、再現性の検討に地下水位を用いる。一般的には、国土交通省水文水質データベースの観測データが使用できる。また、地方公共団体では独自に地下水位や湧水量の観測等を行っている場合もあり、関係部局から収集する。

#### 7) 地下水利用関係

水循環解析では、再現解析等に地下水の採取量を用いる。地下水の採取量報告を義務付けている地方公共団体の場合は、その関係部局から収集する。

#### 8) 土地利用関係

水循環解析では、土地利用により地下浸透量等が異なることから、土地利用データが必要となる。一般的には、国土交通省の国土数値情報等のデジタルデータが使用できるほか、国土地理院の数値地図 5000（土地利用）が使用できる。また、過去から現在までの市街化による水循環の変化を検討する場合などは、国土地理院の 1/25,000 地形図や空中写真、都市計画図などの古い資料を収集する。なお、水田の多い地域で詳細なモデル化を行う場合については、その位置情報を地方公共団体の関係部局から収集する。

また、水循環健全化のための施策評価のために必要な資料の例を以下に示す。

#### 9) 水田湛水による地下水涵養

水田湛水を実施する地域の水田分布や水田の減水深データを地方公共団体の関係部局から収集する。なお、これらのデータが入手できない場合には、既存文献（農業土木ハンドブック等）や類似事例等を収集する。

1 0) 地下水採取規制

地下水利用関係で収集した情報をもとに、用途別、季別等で地下水採取規制の条件を設定し、その設定に基づいた地下水採取の仮想データ（平面分布・深度別）を設定する。

1 1) 雨水浸透施設の設置

想定している雨水浸透施設の諸元を設定するとともに、雨水浸透施策を導入する地域の土地利用図や都市計画図及び用途地域の情報のほか、事業所や施設、建物の数や規模、そして土地の建ぺい率などの情報を、地歩公共団体の関係部局から収集する。また、既存の雨水施設の設置状況も収集する。

表2 水循環解析に一般に用いられる資料の例

分類	項目	資料名：入手先等	主な用途
地形・地質関係	陸域地形 (標高)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1/25,000 地形図 (10m メッシュ DEM)：国土地理院</li> <li>・LP データ (1m または 5m メッシュ DEM)：国・地方公共団体、国土地理院等</li> <li>・都市計画図：地方公共団体</li> <li>・河道縦断・横断面図：河川管理者</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モデル構造の設定 (地形モデル等)</li> <li>・解析条件の設定 (境界条件等)</li> </ul>
	海底地形 (標高)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・沿岸の海底地形図 (1/50,000)、海底地形デジタルデータ：日本水路協会</li> </ul>	
	地質平面図、地質断面図	<ul style="list-style-type: none"> <li>・20 万分の 1 シームレス地質図：(国研) 産業技術総合研究所</li> <li>・土木地質図、地盤図：地方公共団体、学会等</li> <li>・地質調査資料、土壌分布図：国、地方公共団体等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モデル構造の設定 (地質モデル等)</li> </ul>
	透水係数等の水理定数	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水理地質図：(国研) 産業技術総合研究所</li> <li>・地質調査資料：国、地方公共団体等</li> <li>・揚水試験資料：国、地方公共団体等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・解析条件の設定 (透水係数等)</li> </ul>
気象関係	雨量、気温、積雪深	<ul style="list-style-type: none"> <li>・アメダスデータ：気象庁</li> <li>・解析雨量データ：気象庁、(一社) 気象業務支援センター</li> <li>・テレメータ雨量：国土交通水文水質データベース</li> <li>・C バンドレーダ雨量データ・X バンド MP レーダ雨量データ：国土交通省</li> <li>・ダム管理事務所データ：ダム管理者 (国、地方公共団体等)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・解析期間の設定</li> <li>・再現解析 (雨量条件等)</li> <li>・予測解析 (雨量条件等)</li> </ul>
河川・河川水利用関係	河川流量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・テレメータ水位：国土交通省水文水質データベース</li> <li>・河川流量調査資料：国、地方公共団体等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・解析期間の設定</li> <li>・再現解析 (再現性の指標)</li> </ul>
	ダム流入量・放流量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ダム管理年報：ダム管理者 (国、地方公共団体等)</li> </ul>	
	河川水の取水量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ダム管理年報：ダム管理者 (国、地方公共団体等)</li> <li>・農業用水取水年報等：地方公共団体等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・再現解析 (過去の取水量)</li> <li>・予測解析 (計画取水量)</li> </ul>
地下水・地下水利用関係	地下水位、湧水量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・テレメータ水位：国土交通省水文水質データベース</li> <li>・地下水位・湧水量観測資料：国、地方公共団体等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・解析期間の設定</li> <li>・再現解析 (再現性の指標)</li> </ul>
	地下水の採取量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地下水揚水量、井戸位置、取水深さ等：地方公共団体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・再現解析 (過去の取水量)</li> <li>・予測解析 (計画取水量)</li> </ul>
土地利用関係	土地利用	<ul style="list-style-type: none"> <li>・国土数値情報土地利用細分メッシュデータ：国土交通省</li> <li>・数値地図 5000：国土地理院</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モデル構造の設定 (地表面モデル等)</li> </ul>
	水田情報	<ul style="list-style-type: none"> <li>・減水深：地方公共団体等</li> </ul>	

## 2章 4節 水循環解析の精度

水循環解析モデルは、流域により地形・地質等の条件に差違が大きいこと等から、流域に関わらず一律に確保される精度は未解明であり、更に、水循環解析の目的に応じて必要となる精度も異なる。そのため、対象流域及び解析目的における適用性について、解析を実施する対象エリア毎に、再現解析を行い、精度を確認する必要がある。

### <解説>

水循環解析は、対象となる流域により、地形・地質の条件や、更には、2章3節で述べたモデルを設定するために必要な資料の精度に、差違が大きいと想定される。更には解析事例の蓄積も必ずしも十分でないことから、現状では、水循環解析モデルとして、流域に関わらず一律に確保される精度は未解明であり、更に、水循環解析の目的に応じて必要な精度は異なる。そのため、対象流域及び解析における適用性について、解析を実施する対象エリア毎に、再現解析を行い、精度を確認し、解析成果の取り扱いを判断する必要がある。

なお、再現解析とは、構築したモデルに、実績の降雨等の外力条件を入力し、出力された河川流量や地下水位の計算値を観測値と比較すること等により、対象エリアにおけるモデルの精度を検証することを言う。

### 3章 水循環解析の流れ

一般的な水循環解析の流れを図3に示す。大まかな流れとしては、まず、水循環解析の諸元（水循環解析の対象エリア、解析期間、解析ケース）を設定する。次に、水循環解析モデルを選定・構築し、再現解析によりパラメータのチューニングを行う。その後、先に設定した解析ケースについて計算を実施し、結果をもとに、水収支や地下水位等高線、地下水の流線軌跡図・流線ベクトル図等を作成するほか、水循環健全化施策の効果検討などを行う。

#### <解説>

一般的に想定される水循環解析の流れは、図3に示すとおりである。

「水循環解析の諸元の設定」では、まず、水循環解析の対象エリアと解析期間を設定する。次に、水循環解析の目的に応じた解析ケースを設定する。

「水循環解析モデルの構築」では、収集した資料に基づき水循環解析モデルの選定と水循環解析モデルの構築を行う。再現解析では、パラメータのチューニングを行って水循環解析モデルの再現性を確認し、設定した解析ケースについて水循環解析を実施する。

「水循環解析結果の整理・活用」では、水収支や地下水位等高線、地下水の流線軌跡図・流線ベクトル図等を作成する。「水循環解析による施策評価」では、対象エリアにおける水循環健全化施策の効果検討などを行う。



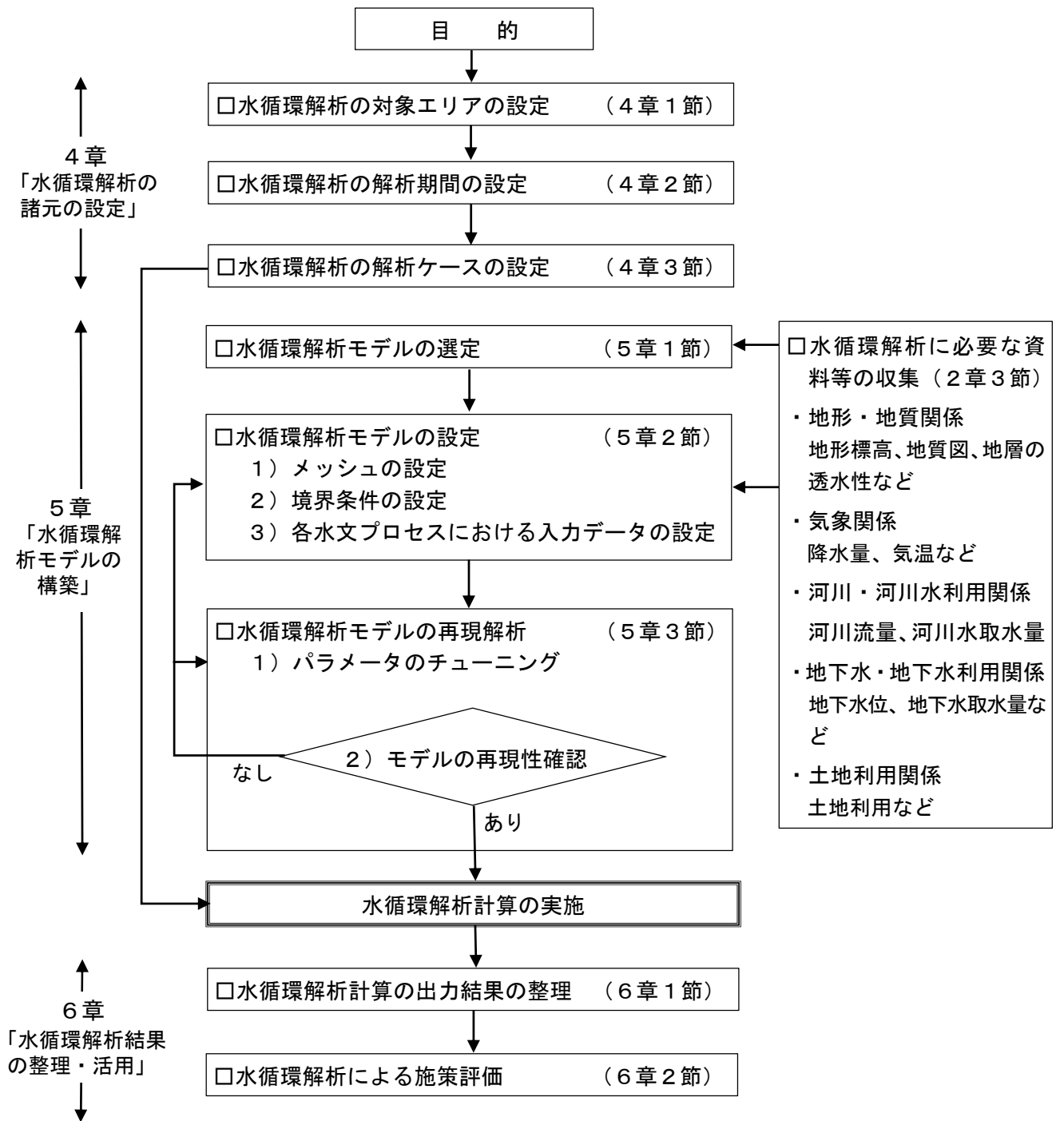


図3 水循環解析の流れ

## 4章 水循環解析の諸元の設定

### 4章 1節 水循環解析の対象エリアの設定

水循環解析の対象エリアは、流域全体もしくは狭窄部の上流域等を対象とし、水循環解析の目的や対象エリアの水循環の特徴を勘案し適切に設定する。

#### <解説>

水循環解析の対象エリアは、地表水の水収支が閉じた水循環系とすることが望ましく、一般的には、河川流域全体もしくは狭窄部がある場合には狭窄部の上流域等を対象に行うものと想定される。

浅層地下水では、一般的に地形分水嶺が流域界として閉じた水循環系を形成していることから、それを対象エリアの境界と設定する。

深層地下水では、図4のように地形分水嶺を越えた地下水流動の考慮が必要となる場合がある。しかし、対象エリアが山地域の広い地形であって、下流の狭い平野の地下水が主たる検討対象となる場合には、地形分水界を大幅に越えた地下水流動を考慮する必要性は低い。図5に、地形分水嶺により対象エリアを設定した事例を示す。

なお、再現性の検証のためにも、一般的には、水循環解析の対象エリアの最下流部が集水地点になっており、河川流量が観測されていることが望ましい。

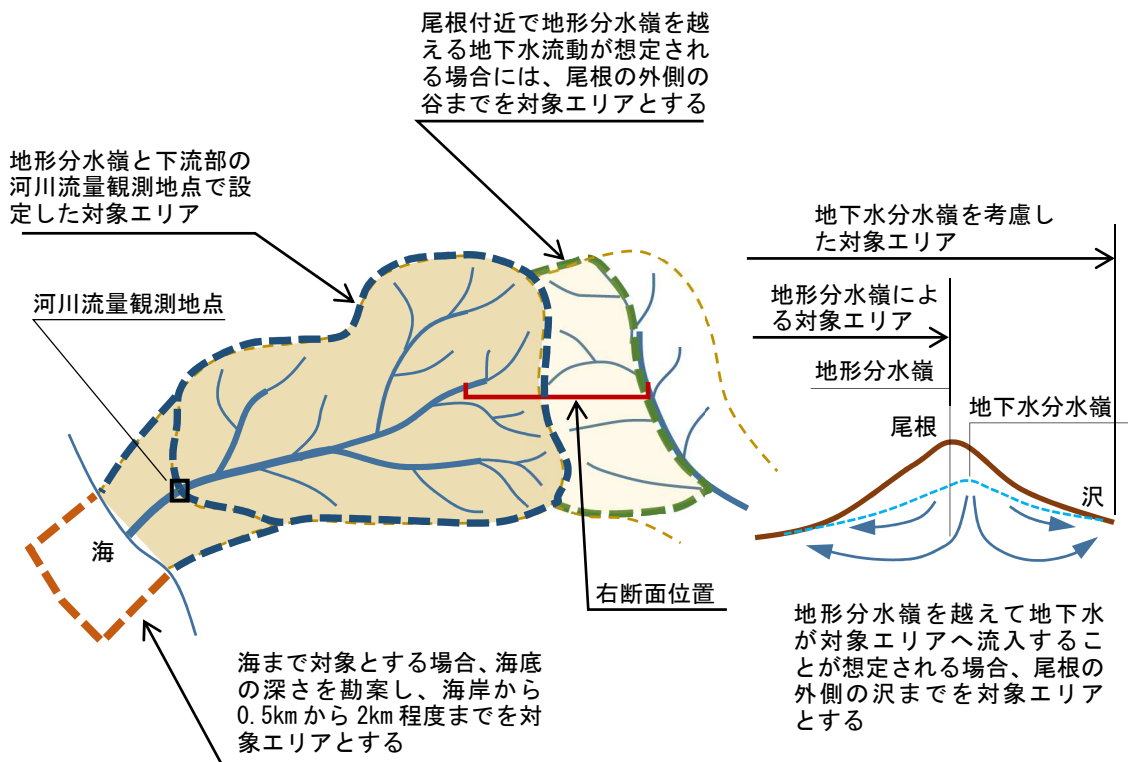


図4 水循環解析モデルの対象エリア設置の概念

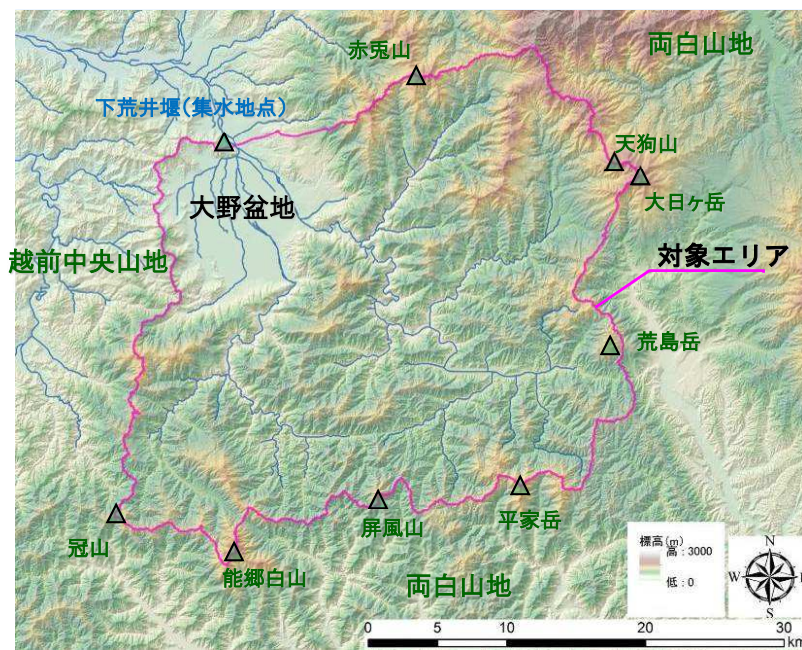


図5 地形分水嶺により対象エリアを設定した例

#### 4章 2節 水循環解析の解析期間の設定

水循環解析の解析期間は、解析目的・解析ケースに応じて適切に設定する。

##### <解説>

水循環解析の期間は、一義的には、解析に必要なデータの存在期間に依存するほか、当該流域の特性や解析目的・解析ケース等に応じて設定される。一般的には、流域の通常の状態を対象とした解析目的・解析ケースの場合は平水年の1年程度が対象となる。一方、気象条件の影響を受けやすい解析目的・解析ケースや、渇水や洪水も影響も視野に入れた解析目的・解析ケースの場合は、渇水年から豊水年を含む概ね10年程度の期間が目安になるものと考えられる。

また、過去からデータがあり、過去の状況の再現や過去からの経年的な推移の再現を目的とする場合や、気候変動の影響の把握を目的とする場合は、解析期間を長期とする場合も考えられる。しかし、水循環解析は、様々な水文プロセスを連成させて計算するため、このような場合、一般に、長い計算時間を要する場合が多く、留意する必要がある。表3に水循環解析の解析期間の目安を記す。

表3 水循環解析の解析期間の目安

解析目的		解析内容	解析期間の目安
基礎的な情報の取得		<ul style="list-style-type: none"> <li>・現況再現</li> <li>・過去の水循環の把握、水循環の経年的推移の再現</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・10年程度（渇水年・豊水年を含む）</li> <li>・観測データが存在する期間（福井県大野のケーススタディでは約30年間の解析を実施）</li> </ul>
視覚的な情報の取得		<ul style="list-style-type: none"> <li>・地下水流動状況の把握 （地下水流線軌跡図・地下水位等高線図）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1年（解析により地下水流線軌跡図や地下水位等高線等を作成する場合には、平水年の1年を想定）</li> </ul>
施策評価の情報の取得		<ul style="list-style-type: none"> <li>・雨水浸透等の効果</li> <li>・地下水揚水量の削減効果</li> <li>・緑地、自然池等の保全</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1年 or 10年（気象条件の影響を受けやすい施策については、渇水年から豊水年を含む10年程度を想定）</li> </ul>
その他	感度解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モデル定数の変化による現況の水文地質構造の特性の把握</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1年（水文地質構造の特性把握のための感度解析については、平水年の1年間を想定）</li> </ul>
	将来予測	<ul style="list-style-type: none"> <li>・気候変動による影響の把握<sup>注</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・約20年～30年間（大規模渇水時や洪水時のみ解析を行うことも想定）</li> </ul>

注：気候変動による影響把握においては、様々なモデルやシナリオで予測が行われているため、解析ケースが多くなる場合があることに留意する必要がある。

#### 4章 3節 水循環解析の解析ケースの設定

解析ケースに応じて、必要な資料を収集し、解析モデルに設定を行う。

##### <解説>

各解析ケースにおける解析モデルへの設定手法の例を表4に示す。

表4 解析ケースの設定例

解析目的	解析ケース	設定手法の例
施策評価の情報の取得	雨水浸透等の効果	雨水浸透施設の種別（浸透マス、浸透トレンチ等）と施設の浸透量を設定する。地方公共団体の関係部局から収集した資料を基に雨水浸透施設の導入範囲と導入数を設定し、導入範囲に該当する水循環解析モデルのメッシュへ降雨時の浸透量を設定する。
	地下水揚水量の削減効果	メッシュ毎、もしくは点（井戸位置）毎に設定した地下水削減量を設定する。
	緑地、自然池等の保全	緑地や裸地など土地利用に応じた浸透能や透水係数などを設定する。
その他	感度解析 モデルの定数の変化による現況の水文地質構造の特性の把握 <sup>注</sup>	水循環解析モデルの地形や地質に関する定数を変化させた条件で解析を行い、現況の解析結果と比較することで、水文地質構造の特性を把握する。具体には、帯水層構造に影響する基盤層（不透水層）の深さを浅くしたり深くしたりする設定を行うほか、帯水層や河川の河床の透水性などを現状よりも大きく、あるいは小さく設定する事等が想定される。
	将来予測 気候変動による影響に把握	気候変動モデルによる計算結果等を使用して、現在及び将来の降水量、気温等を設定する。

注：水循環解析では、地質構造に関する入手可能な資料は限定的である場合が多く、地質モデルの作成では少ない情報から水文地質構造を推定するケースが多い。そのため、水文地質構造を変化させる感度解析が対象エリアの水循環特性の考察に寄与するケースがある。

## 5章 水循環解析モデルの構築

### 5章 1節 水循環解析モデルの選定

水循環解析モデルは、近年、多くのモデルが公表されている。水循環解析モデルの選定は、解析の目的、対象エリアの特性、入手できる資料等の状況を踏まえ、各解析モデルの特徴を基に、適切な解析モデルを選定する。

#### <解説>

近年の計算機の向上と相まって、水循環解析モデルは、近年、多くのモデルが公表されている。モデル個々に特徴があるものと想定されるが、特に、地下水モデルの構造、メッシュ形状、河川水と地下水の水交換の表現手法等に特徴的な差がある。

地下水モデルの構造には、三次元的に地下水流動を表現したものと、複数帯水層間の鉛直方向の地下水量の移動を、簡易的に表現している準三次元モデルなどがある。一般的には、帯水層の層厚が急変する山地を含む解析では、三次元モデルが適している。

メッシュ形状には、正方形モデルや任意の四角形メッシュを設定できるモデルなどがある。メッシュ形状に自由度が高い方が、一般的には、山地の谷や尾根の再現性を高めることに適しているものと思われる。

河川と地下水の水交換の表現手法については、地表水モデルと河道モデルを組み合わせて河川流量を計算し、河川水位と地下水位の差で浸透量を計算するものや、河川と地下水を一体的に解析し、地下水流出と表面流出から河川が再現され河川流量を計算するものなどがある。一般的には、扇状地など、河川と地下水の水交換が活発な地域には、これを精緻に表現したモデルが適しているものと思われる。

なお、水循環解析モデルは精緻になればなるほど、一般的に、解析時間を要することに留意する必要がある。

これらを踏まえて、解析の目的、対象エリアの特性、入手できる資料等の状況を勘案し、解析モデルの特徴を基に、適切な解析モデルを選定する。

なお、参考資料 1)に、福井県九頭竜川流域（下荒井堰上流部）において GETFLOWS を適用した解析事例を記すが、解析事例を情報提供するのみで、同モデルの使用を推奨するものではないことに留意されたい。

## 5章 2節 水循環解析モデルの設定

### 1) メッシュの設定

メッシュの設定は、水循環解析モデルを構築する最初の作業である。選定した水循環解析モデルの種類によりメッシュの平面形状は異なり、三角形や四角形などのメッシュにより対象エリアを分割する。

#### <解説>

水循環解析モデルの構築は、はじめに対象エリアのメッシュを設定し、そこに様々なデータや物性値（パラメータ）を設定する。

メッシュの平面形状は水循環解析モデルによって異なり、水循環解析モデルが差分法の場合は、四角形となる。水循環解析モデルの地下水モデルが有限要素法の場合は、三角形もしくは四角形となる。四角形メッシュのモデルであっても、メッシュの形状設定の自由度が異なり、正方形メッシュのみが設定できるモデルや任意の四角形メッシュを設定できるモデルなどがある。

設定したメッシュには、地層の透水係数などの物性値（パラメータ）や降水量などの入力データを設定する。

なお、深度方向のメッシュの設定深さは、選定した水循環モデルの地下水モデルの特徴に応じ設定する。例えば、地下水モデルが三次元モデルであれば、一般的には、不透水性の基盤層とみなせる深さまでメッシュを設定するものと思われるが、準三次元モデルでは、帯水層の下面までのメッシュ設定となる。

## 2) 境界条件の設定

水循環解析モデルでは、対象エリアの境界部に、対象エリア外からの水の出入りの条件となる境界条件を設定する。

### <解説>

境界条件とは、水循環解析の境界部に設定する水の出入りの条件である。境界条件には図6のような種類がある。

不透水境界は、水の出入りがない境界であり、地下水分水嶺等に設定される。

固定水頭境界は、河川や湧水などの水の出入りのある境界であり、対象エリアの境界もしくは内部の河川等に水位を与える。

浸出境界<sup>注)</sup>は、地下水が地表面から流出できる境界であり、河川に面した斜面の下部や山地の谷底など地下水位の上昇によって地下水が湧き出す地形面に設定する。

降雨浸透境界は、降雨が地表面を浸透できる境界であり、山地や丘陵、台地など、上記の境界条件を設定していない大部分の地表面が該当する。

これらの境界条件は、水循環解析モデルのほとんどで設定が必要となるものと想定されるが、モデルによれば、地表水、河川及び地下水を一体として解析するため、降雨浸透境界と浸出境界は設定しない場合もある。境界条件の設定では、このような対象エリアにおける水の出入りの状況や水循環解析モデルの特徴を考慮して、適切に境界条件を設定する必要がある。

なお、水循環解析を実行するために、有限差分法モデルではメッシュに、有限要素法モデルでは節点に、解析開始時点の水頭値を初期条件として設定する必要がある。

注：浸出境界には、モデルにより固定のものの変のものがある。



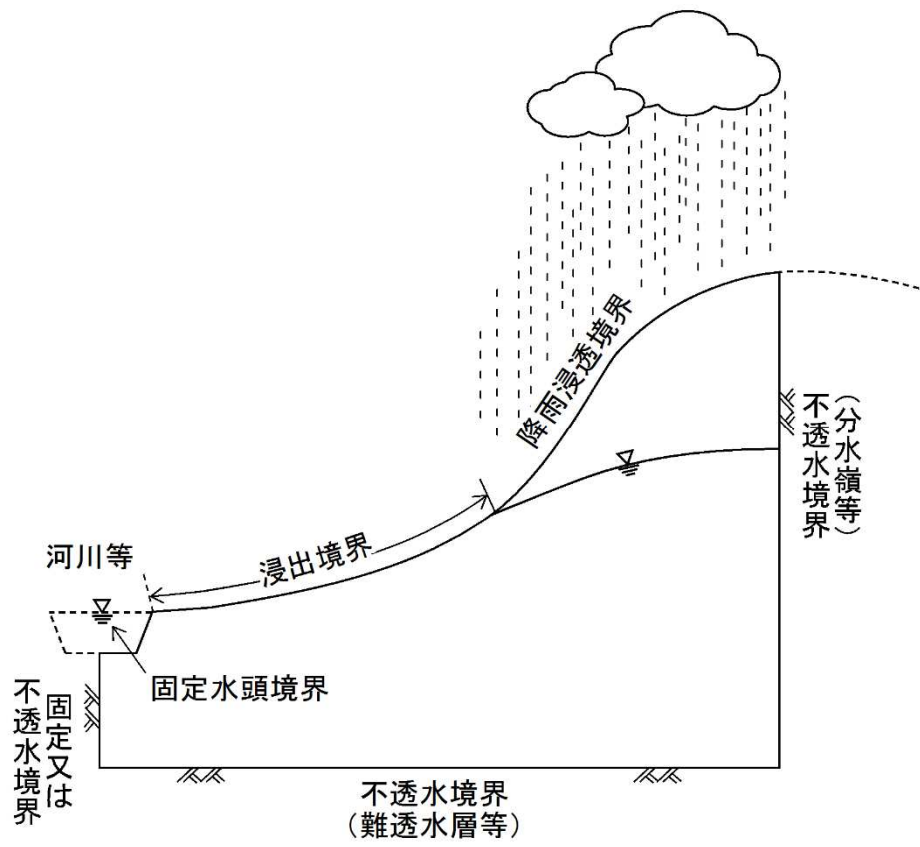


図6 境界条件の概念図

### 3) 各水文プロセスにおける入力データの設定

水循環解析モデルにおいて、降雨、融雪、蒸発散、表面流出、地下浸透、地下水流動、河道流、地下水揚水、及び河川水と地下水の水交換などの水文プロセスを再現するため、必要となる入力データを設定する。

#### <解説>

水循環の各水文プロセスを再現するために、水循環解析のために収集した必要となる資料等を用いて、水循環解析モデルに必要な入力データを設定する。

以下、一般的に想定される設定手法について解説する。

#### (ア)降雨

降水量は、気象庁等の雨量観測所の日雨量データを用いることが多い。対象エリアに複数の観測地点データが存在する場合には、対象エリア内及び周囲の雨量観測点も考慮してティーセン分割法や等雨量線法等を適用し、対象エリア内の日平均降水量の空間分布を作成し、必要な場合にはさらに高度補正を行ってから水循環解析モデルへ入力する。なお、近年は、雨量の空間分布データである気象庁の解析雨量（デジタル）の利用が可能となっており、このデータを利用することも可能である。蒸発散で説明するとおり、水循環解析モデルへの入力データは、降水量から蒸発散量を差し引いた有効水量とする。

#### (イ)融雪

融雪は、高緯度・高標高域の寒冷地域における雨量が、積雪となって地表面に貯留された後に、気温の上昇とともに溶ける水文プロセスである。そのため、観測された雨量を高度補正し、気温により積雪へ変換する。そして、気温の上昇に伴って積雪深から融雪量への変換を行い、融雪量として降水量に加える。

代表的な積雪深と融雪量の推定式として、菅原の式を以下に示す。

○積雪条件：日平均気温 ( $T_m$ ) が融雪温度 ( $T = 0^\circ\text{C}$ ) を下回る場合 ( $T_m < 0^\circ\text{C}$ )

$$\text{日融雪量 } r_m = 0 \quad \text{日積雪深 } h = h_p + P$$

$$\text{日降水量 (融雪量含む) } P_m = 0$$

○融雪条件：日平均気温 ( $T_m$ ) が融雪温度 ( $T = 0^\circ\text{C}$ ) を上回る場合 ( $T_m \geq 0^\circ\text{C}$ )

$$\text{日融雪量 } r_m = m \cdot T_m + (C_w \cdot T_m \cdot P) / L_w \quad \text{日積雪深 } h = h_p - r_m$$

$$\text{日降水量 (融雪量含む) } P_m = P + r_m$$

ここで、 $h_p$  : 前日までの積雪深、 $P$  : 日降水量 ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ )

$m$  : 融雪係数 (一般値は  $6.0 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{日} \cdot ^\circ\text{C}$ )

$C_w$  : 降雨の比熱 ( $\text{MJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )  $L_w$  : 氷の融解潜熱 ( $\text{MJ}/\text{kg}$ )

### (ウ)蒸発散

蒸発散は、可能蒸発散量の算定方法として、ソーンズウェイト式やハーモン式など気温や日照時間を用いて推定できる経験式による方法や、ペンマン・モンテューズ式や熱収支法のように、気温や日照時間のほか相対湿度や風速、地表面の反射率（アルベド）などのデータも用いた半経験・理論式などがある。

これらのうちソーンズウェイト式やハーモン式等の推定方法は、地表面における可能蒸発散量を推定する方法であるため、推定値には不確実性を内在する。したがって、水収支が成立する河川流量観測地点の集水域において、流域降水量と河川流量の関係から月や年蒸発散量を推定する水収支法による蒸発散量と比較することによって、実蒸発散量の推定精度を確認する検討が行われる場合もある。

以下、ソーンズウェイト式とハーモン式を参考として示す。

#### ○ソーンズウェイト式

ソーンズウェイト式は、米国において丈の低い緑草で密に覆われた地表面に不足しないよう給水した場合の蒸発散量を、月平均気温と月平均可照時間の関数で表した可能蒸発散量の推定式（経験式）である。式は、下記のとおりである。

$$E_p(i) = 0.533D_0(i)(10T_i/J)^a$$
$$a = 6.75 \times 10^{-7} J^3 - 7.71 \times 10^{-5} J^2 + 1.79 \times 10^{-2} J + 0.492$$
$$J = \sum_{i=1}^{12} (T_i/5)^{1.514}$$

ここで、 $i$ ：月、 $E_p(i)$ ：日平均蒸発散量（mm/d）、 $D_0(i)$ ：12時間/日を単位とする*i*月の月平均可照時間、 $T_i$ ：月平均気温（℃）である。

#### ○ハーモン式

ハーモン式は、全米のライシメーター（降雨等の底面からの浸出量を測定する装置）から得られた蒸発散量観測値と気温の関係から、月平均気温と月平均可照時間及び飽和絶対湿度の関数で表した可能蒸発散量の推定式（経験式）である。式は、下記のとおりである。

$$E_p(i) = 0.14D_0(i)^2 P_t$$
$$P_t = (217 \times e_{sat}) / (T_i + 273.15)$$
$$e_{sat} = 6.11 \times 10^4 (7.5 \times T_i / (T_i + 237.3))$$

ここで、 $i$ ：月、 $E_p(i)$ ：日平均蒸発散量（mm/d）、 $D_0(i)$ ：12時間/日を単位とする*i*月の月平均可照時間、 $P_t$ ：飽和絶対湿度（g/m<sup>3</sup>）、 $e_{sat}$ ：飽和水蒸気圧（hPa）、 $T_i$ ：月平均気温（℃）である。

(エ) 地下浸透

地下浸透は、水循環解析モデルにおいて、地表面から地下に浸透する水文プロセスである。地表面における浸透量の計算は、水循環解析モデルの種類によって異なっている。地下水を飽和不飽和浸透流として取り扱うモデルは、地表面の地質の透水性（透水係数、水分特性曲線など）を物性値として設定する。地下水を飽和浸透流として取り扱うモデルでは、地表面の浸透量は、初期・終期浸透能を物性値とするホートン式を用いた方法やタンクモデルを用いた方法により計算し、水循環解析モデルの入力値として設定する。以下、ホートン式・タンクモデルに関する解説を記す。

○ホートン式

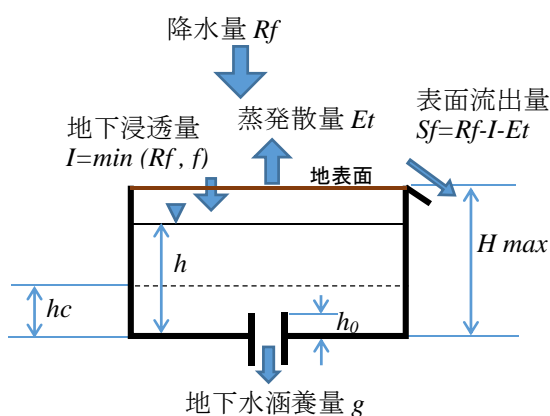
地表付近の土層の浸透量を算出する式であり、浸透量が降雨の開始後から減少し始め、最終的には一定値に近づく特性を表す式であり、以下のとおりである。

$$f = fc + (fo - fc) e^{-kt}$$

ここで、 $f$ ：浸透量 (mm/h)、 $fo$ ：初期浸透能 (mm/h)、 $fc$ ：終期浸透能、 $k$ ：減衰係数、 $t$ ：時間である。初期浸透能、終期浸透能及び減衰係数は、現地における浸透試験により求める。

○タンクモデル

タンクモデルは、流域からの河川流量を再現する場合と帯水層の地下水位を再現する場合、分布型の水循環解析モデルへ入力する地下浸透量を求める場合など様々に利用されている。図7は、表層土層において降水量が蒸発散量、表面流出量、地下浸透量に分配される現象を、1段のタンクモデルで再現したモデルである。



左図において次式により降雨を分配する。

$$\begin{aligned} \text{浸透能 } f &= (fo - fc) / h_{max} \times (h_{max} - h) + fc \\ &= fo - (fo - fc) / h_{max} \times h \end{aligned}$$

$fo$ ：初期浸透能、 $fc$ ：終期浸透能

地下水涵養量

$$g = fc / (hc - h_0) \times \min(h - h_0, hc - h_0)$$

( $hc = h_0$  のときは  $g = fc$ )

$hc$ ：地下水涵養量が一定となる貯留高

$h_0$ ：圃場容水量

図7 1段タンクモデルによる表層土壌での降雨分配の例

#### (オ)表面流出

表面流出は、水循環解析モデルにおいて、地下浸透量が地表面の浸透能を超えた場合に地表面に発生する水文プロセスである。表面流出水は、地表面の勾配にしたがって河川へ流出する。水循環解析モデルの種類によってモデル化の方法は異なっているが、Kinematic Wave 法を用いている場合が多いものと想定される。

この手法の表面流出水の流れは、地表面の勾配や土地利用に基づく水の流れやすさを表す物性値である粗度係数を設定し計算する。粗度係数は、土地利用に対する一般値が既存文献で示されている。

以下、Kinematic Wave 法を参考として示す。

#### ○Kinematic Wave 法

Kinematic Wave 法は、開水路の水の流れを近似的に計算する式で、次式で表される。

$$h = Kq^p$$
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e$$

ここに、 $h$  : 斜面及び河道における水深 (m)、 $q$  : 斜面及び河道における単位幅流量 (m<sup>3</sup>/日/m)、 $r_e$  : 有効降雨強度 (m/日)、 $K$  値および  $p$  値は、マニング式から、

$$K = \left( \frac{N}{\sqrt{I}} \right)^{3/2} \quad p = 0.6$$

ここで、 $N$  : 流域平均等価粗度 (s/m<sup>1/3</sup>)、 $I$  : 流域平均斜面勾配、である。

#### (カ)地下水流動

地下水流動は、水循環解析モデルにおいて、地下水が地層を流れ、河川や湧水、海などへ流出する水文プロセスである。殆どの水循環解析モデルが、ダルシー則と連続の式が基礎となっており、設定する入力パラメータ (物性) は主に表 5 となる。

#### ○ダルシー式

$$Q = KIA$$

ここで、 $Q$  : 地下水流動量 (m<sup>3</sup>/s)、 $K$  : 地層の透水係数 (m/s)

$I$  : 動水勾配、 $A$  : 地層 (帯水層) の地下水流動断面積 (m<sup>2</sup>)

地下水流動をモデル化する考え方により水循環解析モデルのタイプが分かれる。地下水の流れを3次元とするモデルは、地下水の鉛直方向の流動を取り扱えることから、対象エリアの標高差が大きい、山地から平野への地下水流動の再現に適している。地下水の流れを多層準三次元とするモデルは、複数帯水層間の水量の移動により、簡易的に、地下水の鉛直方向の流れを表現しているため、標高差が大きい山地などでは三次元の地下水の流れを表現することが難しいという特徴がある。そのため、対象エリアの標高差が小さい丘陵、台地や平野の再現に適している。

地下水流動のモデル化の考え方は、水循環解析モデル選定の要件の一つとなる。

#### (キ)河道流

河道流は、水循環解析モデルにおいて、河道へ流入した表面流出水と河道へ流出した地下水が下流へ流動する水文プロセスである。水循環解析モデルは、河川や谷を河道網としてモデル化し、線データとして設定した河道に横断面形状や河床の粗度係数を設定し、Kinematic Wave法によって河川流量を計算するタイプが多いものと想定される。近年は、事前に河道網をモデル化せず、地表面に発生した表面流出水と谷や河道などへ流出した地下水を合わせ、マニング式と連続式による近似式で地形の最大傾斜方向へ水量を計算するモデルが開発されている。このようなモデルは、谷や河道の地形再現が重要になる。

#### (ク)地下水揚水

地下水揚水は、水循環解析モデルにおいて、地層から地下水を取水する人為的な水文プロセスである。地下水利用の多い地域では、流域の水収支に大きな影響を及ぼしている場合もある。地下水揚水量は、地下水の取水規制を導入している一部の地方公共団体では、揚水井戸の深さやストレーナーの深度、月・年揚水量などの報告を義務付けている場合が多く、それらのデータを収集する。なお、報告を義務付けている場合でも、報告で求める揚水量は一定口径以上の揚水井である場合や年間揚水量である場合は、収集できた資料から実態の揚水量や月揚水量などの推定を必要とする場合も想定される。

#### (ケ)河川と地下水の水交換

河川と地下水の水交換は、水循環解析モデルにおいて、河道における河川水の浸透と地下水の流出により河床付近を水が交互に流動する水文プロセスである。河川水位と河川周辺の地下水位との相対的な関係により、河川水位が地下水位より低い場合には地下水が河川へ流出し、河川水位が地下水位よりも高い場合には河

川水が地下へ浸透する現象となる。地層の透水性が大きい扇状地の河川では、河川水が地下へ浸透し、河川が地下に浸透している場合が多い。

水循環解析モデルでは、河道網に河床高さと河川水位を設定しておき、計算される地下水位と比較して河川への地下水流出量や河川からの浸透量を計算するモデルが多いものと想定される。近年は、河道網を設定せず地下水と河川の水圧を一体として計算することにより、自然に河川と地下水の水交換を取り扱うモデルも開発されている。

## 5章 3節 水循環解析モデルの再現解析

### 1) パラメータのチューニング

水循環解析モデルの構築では、水循環解析モデルに設定する透水性等のパラメータのチューニングを行い、再現性の向上を図る。

#### <解説>

水循環解析モデルの再現性を高めるため、パラメータのチューニングを行う。チューニングとは、様々なパラメータで試行計算を繰り返し、最適なパラメータを設定することを言う。水循環解析では、各水文プロセスの設定にあたり、特に、地下水流動特性に係る地層の透水係数などのパラメータのチューニングが重要となる。表5に、一般的に想定されるパラメータの概要とチューニング手法の例を示す。

表5 水循環解析に係るパラメータとチューニング手法の例<sup>注)</sup>

パラメータ	パラメータの概要	チューニング手法
透水係数	地層中の地下水の流れやすさを決める物性値である。既存文献に基づく一般値や現地調査による試験値（透水試験、揚水試験等）に基づき設定する。地質構造により異方性のあることが知られており、必要に応じて水平方向と鉛直方向の透水係数をそれぞれ設定する。	観測地下水位を再現するために、地質とその分布、降雨に伴う地下水位の変動、地下水位等高線の谷形状などに着目し、一般値や得られている試験値の幅を参考にして試行計算により設定する。
有効間隙率	地層中の間隙の割合で、特に地下水が流れる間隙の割合を示す物性値である。一般的には、既存文献に基づき設定する。	浅層地下水が分布する不圧帯水層に対し、地質や降雨に伴う地下水位の変動などに応じ、試行計算により設定する。
貯留係数	地層から地下水をくみ上げた際に生じる水頭低下に伴い、地層の水平単位面積当たりの貯留から放出される水量。一般的には、既存文献に基づき設定する。	深層地下水が分布する被圧帯水層に対し、地層の土質状況（砂質土系か粘性土系かなど）を勘案して設定する。
不飽和土の浸透特性	不飽和状態の地層の水分量（体積含水率（もしくは飽和度））に対する地層の間隙水圧（負の圧力水頭（サクション））の関係と不飽和状態の地層の透水係数の関係である。前者の関係は水分特性曲線と呼ばれる。一般的には、既存文献に基づき設定する。	不圧地下水位の深さ付近より浅く分布する地層の土質状況（砂質土系か粘性土系かなど）を勘案して、一般的な水分特性曲線（体積含水率と負の圧力水量の関係）などを設定する。

注：これらの物性値の詳細については、参考文献6）参照。



## 2) 再現解析

水循環解析モデルの構築では、再現解析を実施して、再現性を確認する。

### <解説>

水循環解析モデルの再現性の確認は、収集した河川流量や地下水位の時系列観測データを用いて行うことが一般的であり、そのほか、地下水位の一斉観測が行われている場合には、その地下水位分布データも用いて確認する。

河川流量は、河川の流況（ピーク流量、豊水流量、平水流量、低水流量、渇水流量）やこれらを含む河川流量の一年間の時系列を比較し、再現性を確認することが望ましい。特に、地下水循環に着目して水循環解析を行う場合には、低水流量の再現性を確認する。図9に河川流量の観測流量と計算流量の比較例を示す。

地下水位は、観測地点における経年変化や季節変化など時系列の地下水位の比較により再現性を確認する。また、地下水位一斉観測により地下水位分布が把握されている場合は、複数観測点の観測水位と解析水位を比較して再現性を確認する。図10に観測地下水位と計算地下水位の経時変化の比較例、図11に観測地下水位と計算地下水位の標高コンター図、散布図での比較例を示す。

水循環解析の解析方法として、図8の概念図に示す定常解析と非定常解析があくなくなった平衡状態を求める解析方法である。一般的に、地層の透水係数のチューニングでは、地下水位分布形態を確認するために年平均降水量や年平均地下水涵養量などを設定した定常解析を繰り返すことにより、地層の透水係数をモデル化していく。また、非定常解析に比べ計算時間が短い利点がある。

非定常解析は、時系列の降水量等を入力することで、河川流量や地下水位等の時間変化を求める解析方法である。定常解析で設定した透水係数や有効間隙率、貯留係数等のパラメータのチューニングを行いながら再現性を高めていく。なお、一般には、非定常解析の解析開始時の初期水頭値には、定常解析の地下水頭値を設定するとともに、初期水頭値から非定常計算の水頭値へ擦り付けるための助走解析期間を設定する。

水循環解析では、P降雨に対する河川流量や地下水位等の応答を見るため、一般的に、非定常解析が実施されることが多いものと想定される。

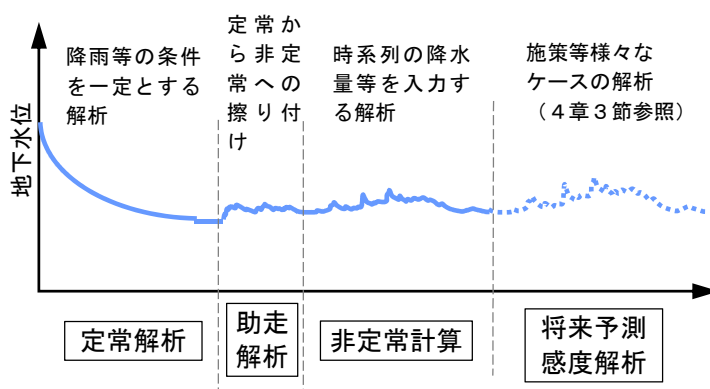


図8 水循環解析の方法と流れ

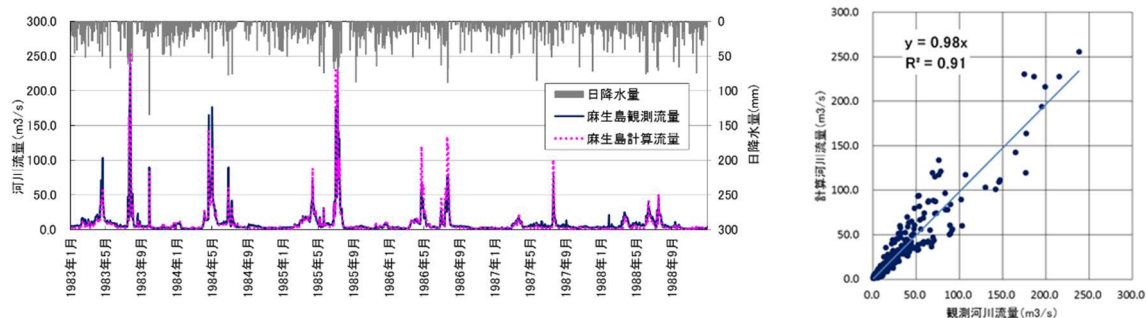


図9 河川流量の観測流量と計算流量の比較例（ダム流入量を用いた例）  
（左：ハイドログラフ、右：散布図（日流量））

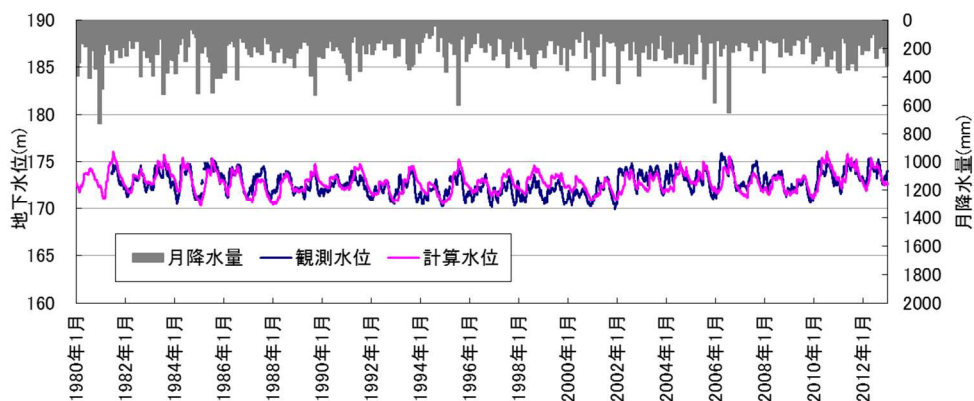


図10 観測地下水位と計算地下水位の経時変化の比較例

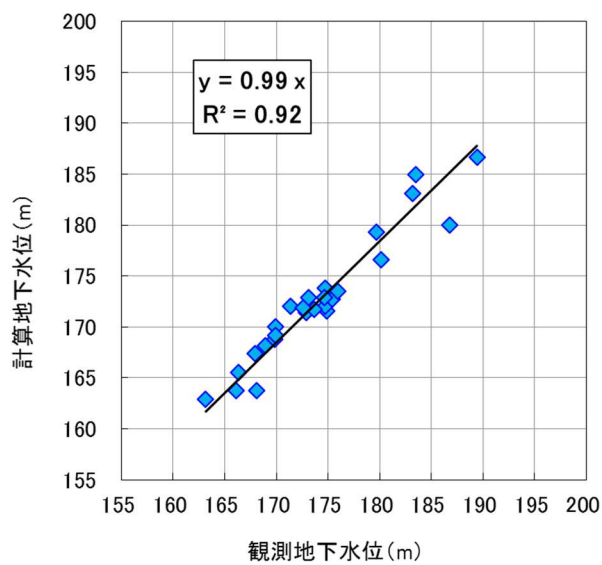
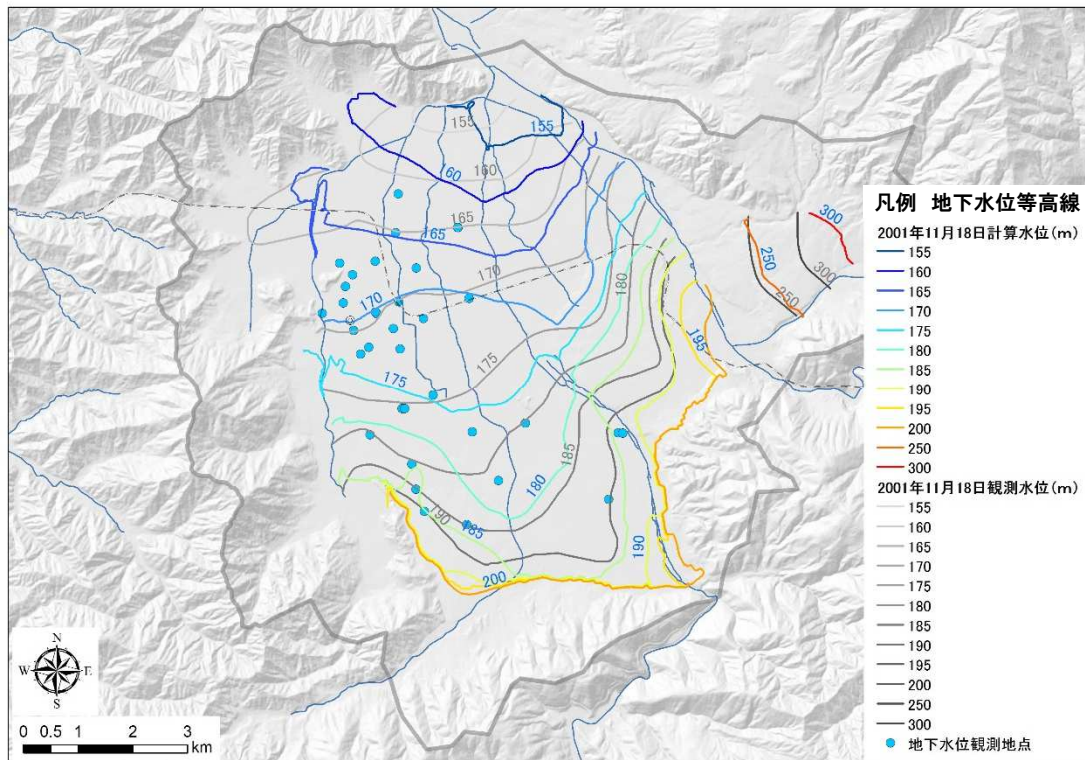


図 1 1 観測地下水水位と計算地下水水位の比較例  
(上：地下水水位標高コンター図、下：地下水水位の散布図)

## 6章 水循環解析結果の整理・活用

### 6章 1節 水循環解析の出力結果の整理

水循環解析計算の結果は、解析対象エリアの水収支や地下水位等高線、地下水の流線軌跡図・流線ベクトル図等を作成することにより、視覚的に理解できるように整理する。

<解説>

#### 1) 水収支

水循環解析計算の結果から、降水、流入、浸透、地下水流動、流出等の水文プロセス毎に水量及び流動量を集計することにより、解析対象エリアにおける水収支を把握することができる。図12は、福井県大野盆地について行った水循環解析計算の結果を用いて、2003年から2012年の10年間の平均年間水収支を求めた事例である。

なお、水循環解析計算の結果から水循環解析モデル内の水量及び流動量を集計するには、別途集計のためのプログラミングが必要となる場合があることに留意する必要がある。

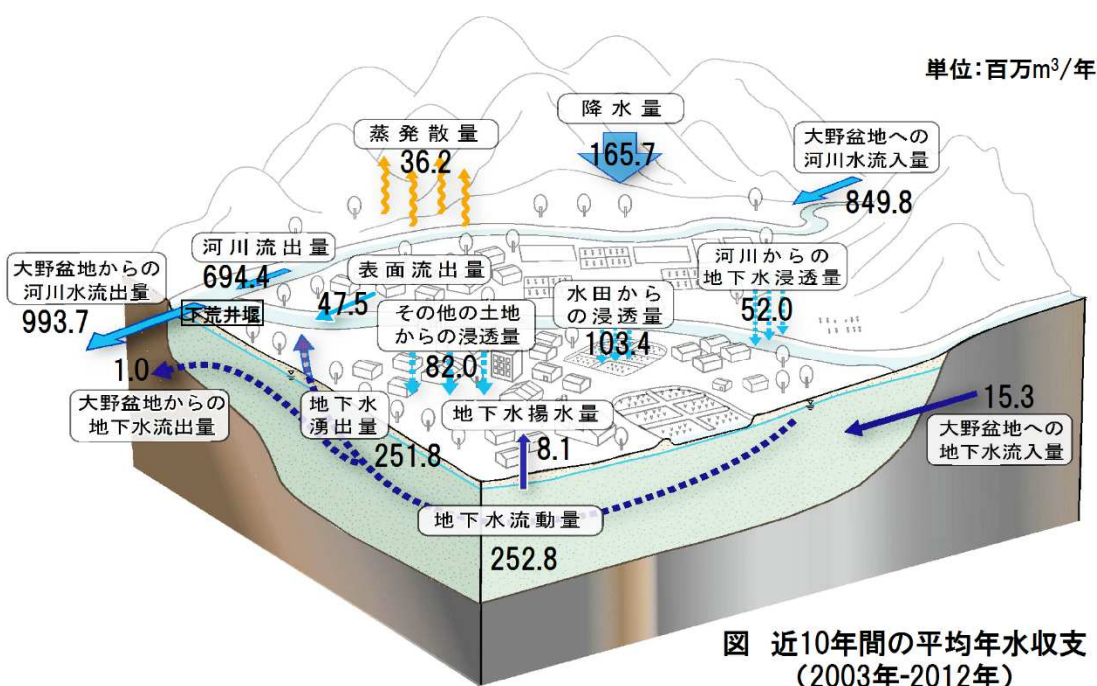


図12 水循環解析計算の結果から作成した水収支図の例

## 2) 地下水位等高線図（地下水位差分等高線図）

地下水位等高線図により対象領域の地下水位の標高や地下水流向を把握することができる。また、水循環健全化施策等の実施により地下水位が広範囲に変化することが想定される場合には、施策前後の地下水位の差をとった地下水位差分等高線図を作成すると、施策の効果を把握しやすい。

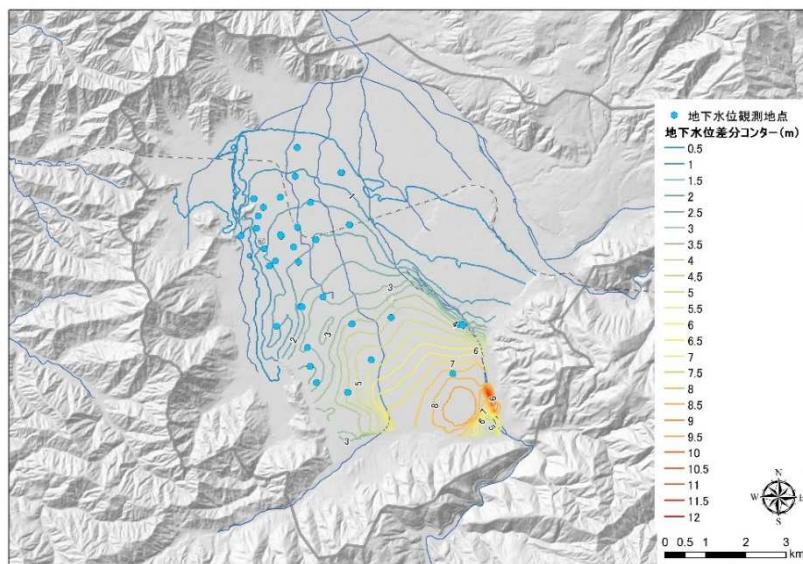


図 1 3 施策前後の地下水位変化を示す地下水位差分等高線図の例

## 3) 流線軌跡図・流線ベクトル図

流線軌跡図により地下水の流れを視覚化することができる。図 1 4 は、福井県大野盆地について行った水循環解析計算の結果から作成した流線軌跡図の事例である。

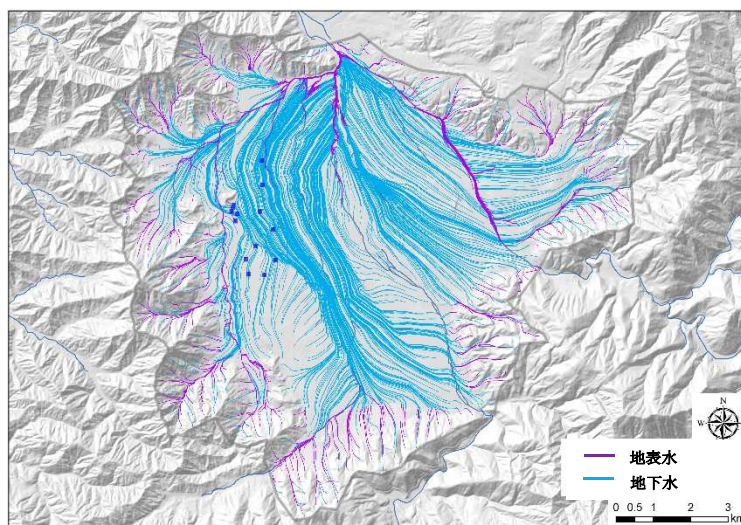


図 1 4 流線軌跡図の例

## 6章 2節 水循環解析による施策評価

水循環に関わる施策の有り無し (with/without) で水循環解析を行った解析結果の比較は、水循環に関わる施策評価を行う上で、客観的・定量的な資料の一つとして取り扱う事が出来る。

### <解説>

以下に、水循環に関わる施策評価を行う上で、客観的・定量的な資料の一つとして取り扱うことを目的に、解析を行った事例を紹介する。なお、施策評価を行う上では、これらの資料の他に、経済性評価や住民の意向、環境影響等を考慮する必要がある。

#### 1) 水田湛水

水循環施策として水田湛水について検討した事例を示す。図15は水田湛水を行った場合の地下水上昇量を地下水位差等高線図で示したものである。水田湛水による地下水涵養量の増加により周辺の地下水位が上昇している状況が確認される。

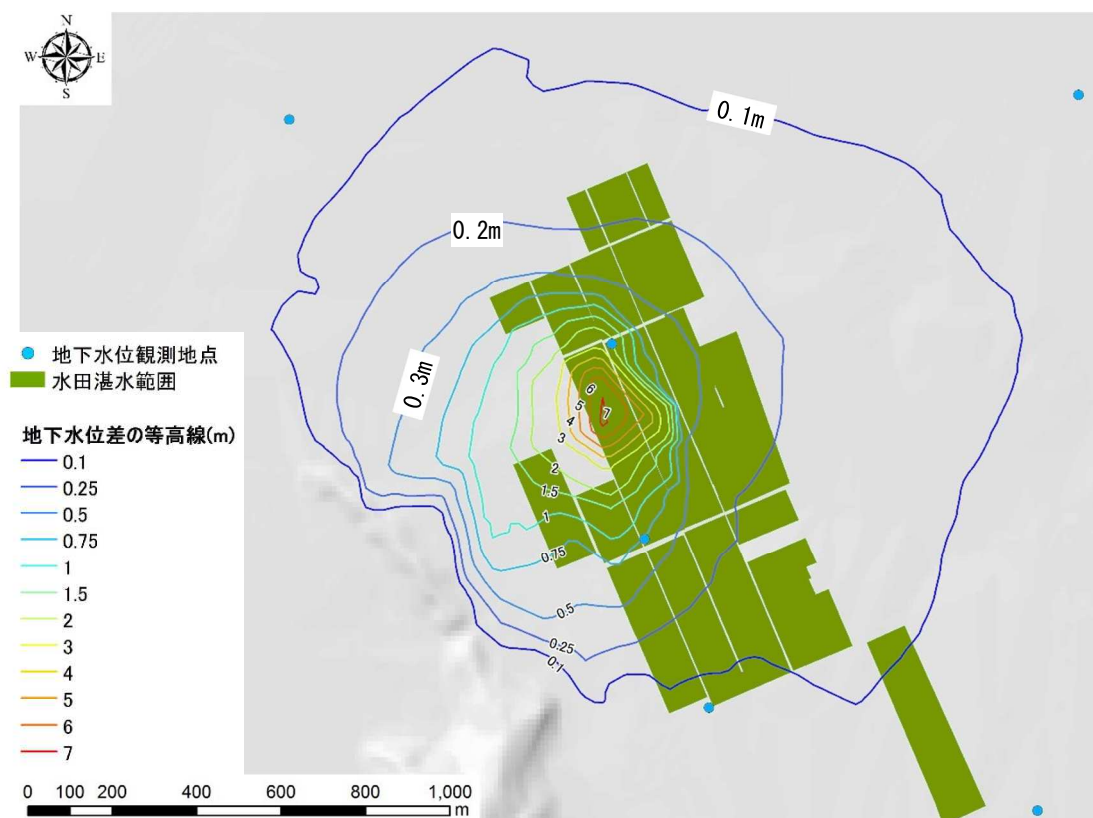
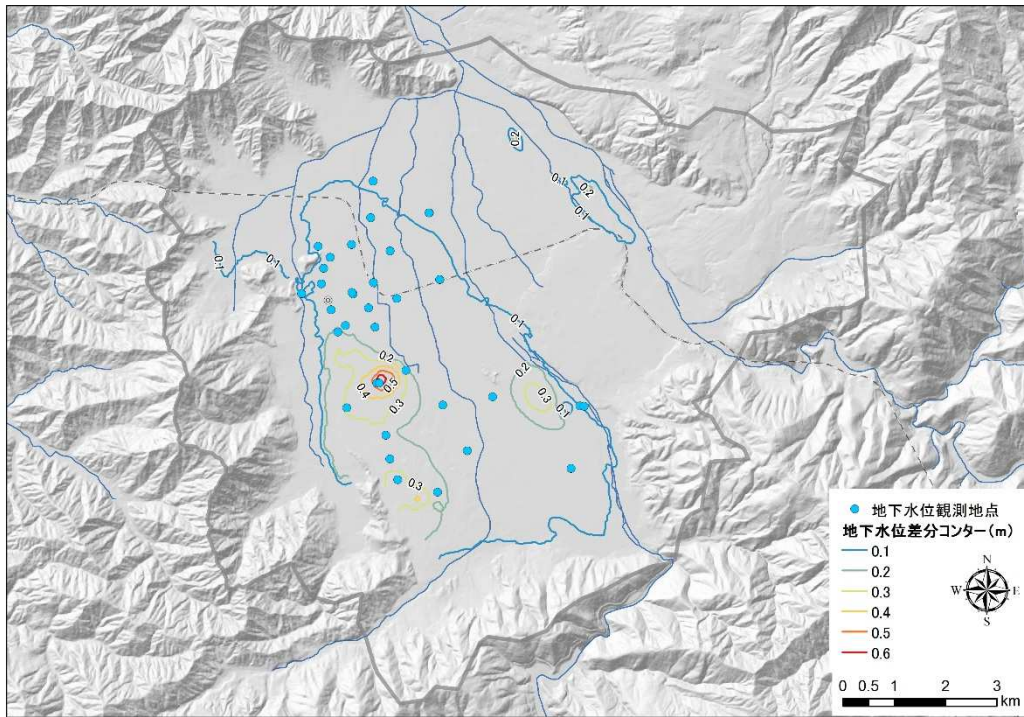


図15 水田湛水の検討事例\*

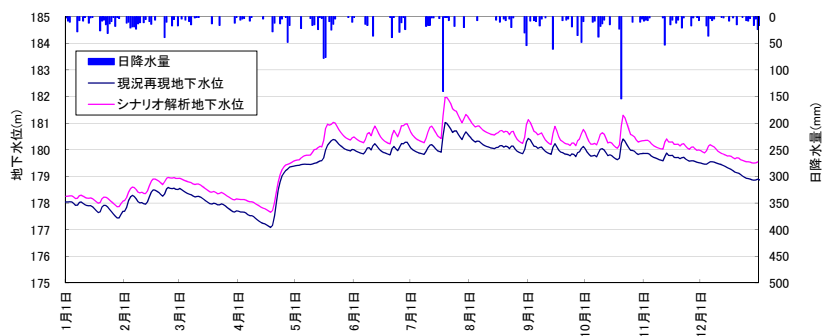
\*水田湛水位置は仮定である。

## 2) 地下水揚水規制

水循環施策として地下水の揚水規制について検討した事例を示す。図16は地下水揚水規制の前後の地下水位差分等高線図および地下水位グラフである。多量の地下水を揚水していた井戸の周辺では、地下水位の上昇している状況が確認できる。



(地下水位差分等高線図)



(地下水揚水規制の前後の地下水位グラフ)

図16 地下水揚水規制の検討事例

※揚水規制の条件は仮定である。

## 7章 おわりに

本書は、水循環基本法の制定を受け、「水循環解析の社会実装の促進が可及的速やかに求められている」との認識のもと、平成 24 年度～平成 26 年度に実施した鳥取県千代川流域<sup>2)</sup> 及び福井県九頭竜川流域（下荒井堰上流部）における水循環解析のケーススタディ<sup>1)、7)</sup> で得られた知見を再構成し、地方公共団体等が水循環解析を実施する際に参考と出来る技術図書とすることを目的としてまとめたものである。

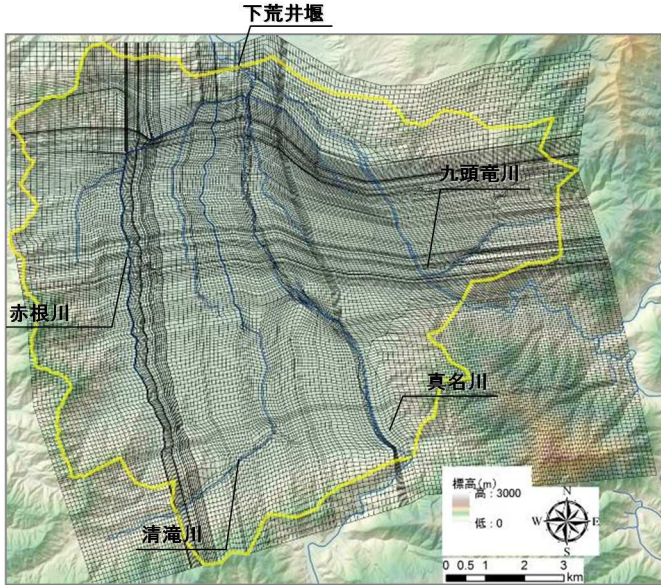
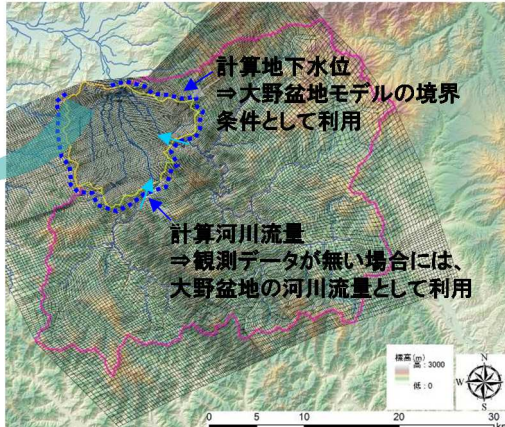
1 章で述べたとおり、水循環解析は、対象となる流域の地形・地質が複雑な場合や、モデルを設定するために必要な資料が十分には入手出来なかった場合など、水循環解析に期待する精度が得られない場合も想定される。そのような場合は、資料・データの不足やパラメータのチューニングの不足等、精度が得られなかった理由を十分に考察し、今後の観測体制や解析に反映させ、長期的な視点からモデルの構築を行うことも重要と言える。

なお、水循環解析は、現状では、解析事例が必ずしも多くなく、水循環解析の活用手法が十分に定まっていない。今後、各機関が水循環解析を行う際には、挑戦的に様々な活用を試みることで、事例を蓄積・公表し、活用手法の更なる確立に資することが期待される。

また、水循環解析は、流線軌跡図や河川からの湧出量等の様々な出力が可能であるが、検証データが不足するため、精度検証が必ずしも十分でない。今後、モデル流域の設定による様々な観測データの蓄積・公開等により、モデルの精度検証がなされるとともに、後発のモデル開発に資することも期待される。



# 1) 水循環解析事例

対象河川・流域	福井県九頭竜川（下荒井堰上流部）
地下水解析の実施目的	<p>国土技術政策総合研究所では、地下水の適正な利用と保全に向けた取組が積極的に行われており、この一環として、地下水位・地下水採取量等のデータ整備が進んでいる福井県大野盆地を対象として平成 25 年度にモデルを構築し、平成 26 年度に再チューニングを行った。</p> <p>本検討は、水循環解析を用いて大野盆地の地下水流動特性と水循環健全化施策の特性の把握のケーススタディを行ったものである。</p>
解析モデル	<p>モデル名称 統合型水循環シミュレータ GETFLOWS (General-purpose Terrestrial Fluid-flow Simulator)</p>
	<p>空間解像度 水平（5m～150m）、深度分割数（14層）</p>
	<p>モデルの構造</p> <p>本検討では、地下水涵養施策の効果等を検討することから、特に、大野盆地において、詳細にモデル化する必要がある。そのため、大野盆地を詳細にモデル化した大野盆地モデルと、そのほかの調査地域をモデル化した広域モデルの双方を設定した。広域モデルで水循環解析を行ったのち、両モデルの境界面で地表水・地下水等のデータを受け渡し、大野盆地モデルで水循環解析を行った。</p> <p>大野盆地モデルの平面メッシュを以下に示す。河川形状や著名な湧水などの形状を表現するために、5m～150mの範囲で柔軟的に設定した（河川付近は1mメッシュ、大野盆地域は5mメッシュ）。平面格子の総数は約45,000個、全体格子は約500,000個となった。</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: right;">大野盆地周辺を切り出し、メッシュを細分化</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">図 広域モデルと大野盆地モデル</p>

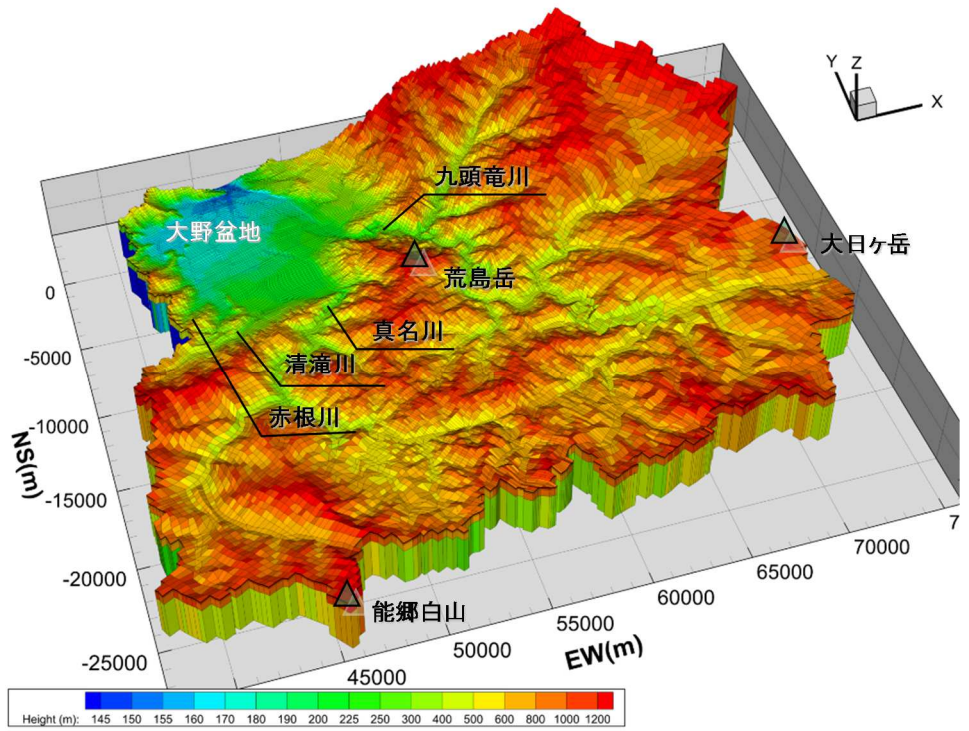


図 広域モデル鳥瞰図

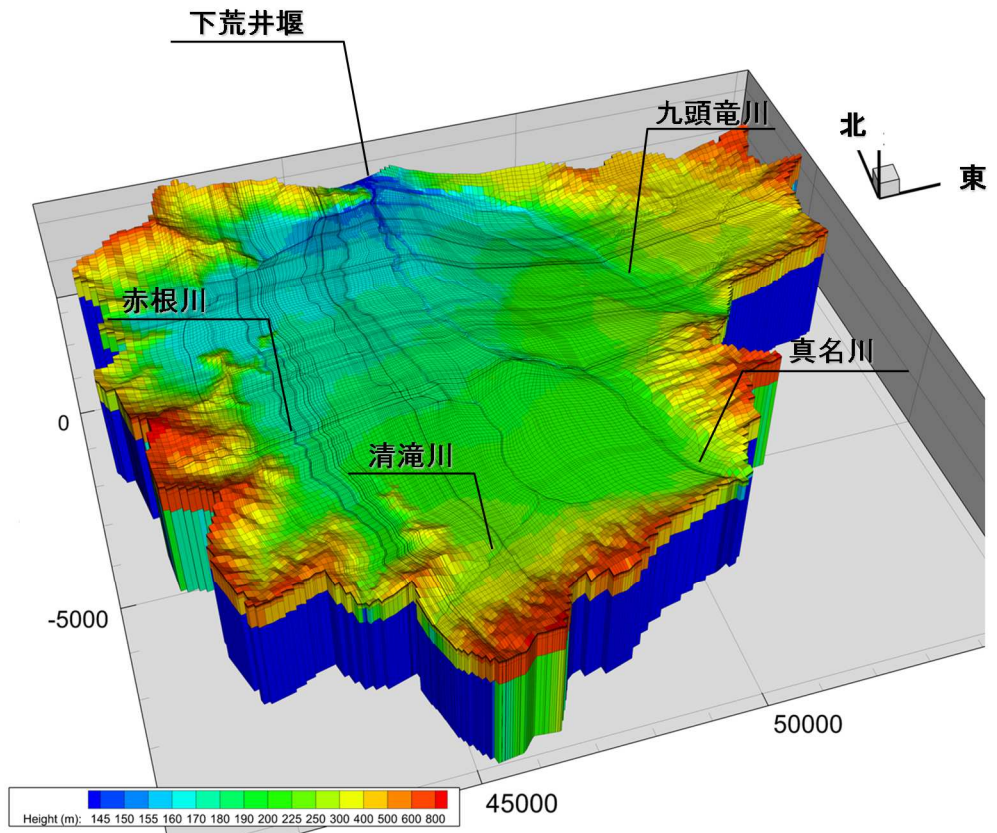


図 大野盆地モデル鳥瞰図

解析に用いたデータの種類の	気象関係	表 気象データの基本諸元				
		管理者	資料名	データ期間	観測点/エリア	出典等
		気象庁	アメダスデータ	S51~H24	九頭竜、勝山、大野	気象庁 HP
		国土交通省	テレメータ雨量	S51~H24	温見、平家平、雲川、熊河、久沢、箱ヶ瀬、長野、中島、真中、大野、下荒井、上打波、石徹白、大宮、大本、勝原、妙金島、六呂師	国土交通省
		福井県	観測データ	S51~H24	本戸、秋生、上大納、朝日前坂、下山、小黒見、奥越土木、下黒谷、勝山分庁舎、伊知地、五所ヶ原、金見谷、河内、皿谷、神当部、笹生	福井県
	地形関係	表 地形データの基本諸元				
			収集資料名	測量方法	整備範囲	
		陸	国土交通省 数値地図 10m メッシュ(標高)	1/25000 地形図等高線	日本全国	
		地	平成 24 年 真名川 LP データ	航空レーザ 測量	大野盆地周辺	
			真名川砂防管内 LP データ	航空レーザ 測量	真名川周辺	

解析に用いたデータの種類

地質関係

表 地質データの基本諸元

管理者	資料名	観測点/エリア	出典等
産業技術総合研究所	20万分の1日本シームレス地質図	大野盆地	産業技術総合研究所
大野市	平成14年度 大野市「大野市地下水総合調査業務報告書」 平成23年度 大野市「大野市地下水シミュレーションモデル 修正業務委託【湧水第1号】報告書」	大野盆地	大野市

表 地質関連の参考文献

収集資料名	作成機関
20万分の1シームレス地質図	(独)産業技術総合研究所

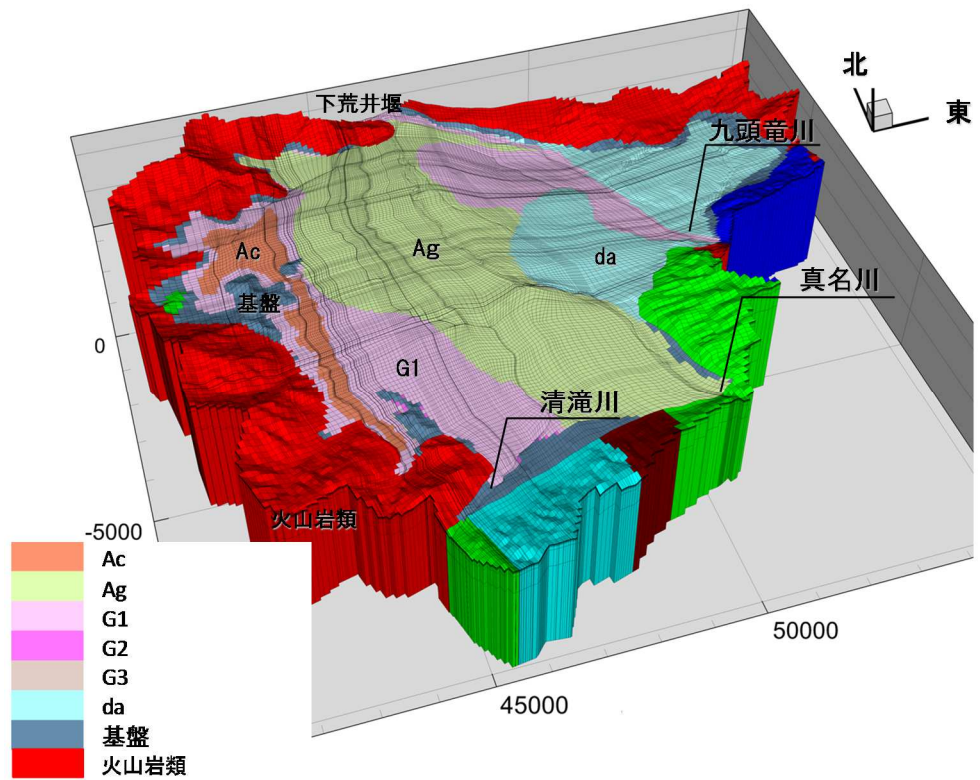


図 大野盆地 地質モデル

解析に用いたデータの種類	河川関係	<p style="text-align: center;">表 水文データの基本諸元</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>管理者</th> <th>観測期間</th> <th>観測頻度</th> <th>河川名</th> <th>観測所数</th> <th>観測所名</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>国土交通省</td> <td>1983～1988年</td> <td>日</td> <td>真名川</td> <td>1箇所</td> <td>麻生島観測所</td> </tr> </tbody> </table>	管理者	観測期間	観測頻度	河川名	観測所数	観測所名	国土交通省	1983～1988年	日	真名川	1箇所	麻生島観測所
	管理者	観測期間	観測頻度	河川名	観測所数	観測所名								
	国土交通省	1983～1988年	日	真名川	1箇所	麻生島観測所								
地下水関係	<p style="text-align: center;">表 水文データの基本諸元</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>管理者</th> <th>資料名</th> <th>データ期間</th> <th>観測点/エリア</th> <th>出典等</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>大野市</td> <td>地下水位観測データ</td> <td>S50～H24</td> <td>大野市内 27箇所</td> <td>大野市</td> </tr> </tbody> </table>	管理者	資料名	データ期間	観測点/エリア	出典等	大野市	地下水位観測データ	S50～H24	大野市内 27箇所	大野市			
管理者	資料名	データ期間	観測点/エリア	出典等										
大野市	地下水位観測データ	S50～H24	大野市内 27箇所	大野市										
土地利用関係	<p style="text-align: center;">表 土地利用データの基本諸元</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>管理者</th> <th>資料</th> <th>データ期間</th> <th>データ密度/解像度</th> <th>観測点/エリア</th> <th>出典等</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>国土交通省</td> <td>国土数値情報 (土地利用細分メッシュ)</td> <td>S51/S62/H3/ H9/H18/H21</td> <td>100m/1km</td> <td>九頭竜川流域</td> <td>国土交通省</td> </tr> </tbody> </table>	管理者	資料	データ期間	データ密度/解像度	観測点/エリア	出典等	国土交通省	国土数値情報 (土地利用細分メッシュ)	S51/S62/H3/ H9/H18/H21	100m/1km	九頭竜川流域	国土交通省	
管理者	資料	データ期間	データ密度/解像度	観測点/エリア	出典等									
国土交通省	国土数値情報 (土地利用細分メッシュ)	S51/S62/H3/ H9/H18/H21	100m/1km	九頭竜川流域	国土交通省									
各水文プロセスの設定手法	降雨	<p>シミュレーションの入力値となる降水量は、多くの観測所データを組み込むことで、面的な情報(分布状況)が密となり、解析精度の向上に繋がる。そこで、本解析では、対象流域を地点雨量が代表する面積に分割し、その面積に比例する重みをつけて平均することにより流域平均雨量を求めるティーセン分割法を適用し、標高補正も行った。</p>												

各水文プロセスの設定手法	融雪	<p>本解析では、菅原の手法を用いて実測された積雪深を再現する融雪量を推定した。</p> <p>菅原の手法では、日平均気温がある融雪温度を下回る場合、降水量を積雪とみなしてタンクに加える。反対に融雪温度より高い場合は、融雪量がタンクから差し引かれ、その水量が降雨に加算されるものとする。</p> <p>具体的な取扱いは次の算定式を用いる。</p> <p style="text-align: center;"><u>日平均気温が融雪温度を下回る場合</u></p> $(T \geq T_m) \begin{cases} r_m = mT + PT / 80 \\ h = h_p - r_m \quad (r_m \leq h_p) \\ P_m = P + r_m \end{cases}$ <p style="text-align: center;"><u>日平均気温が融雪温度を上回る場合</u></p> $(T < T_m) \begin{cases} r_m = 0 \\ h = h_p + P \\ P_m = 0 \end{cases}$ <p>ここに、<math>T</math> は日平均気温(<math>^{\circ}C</math>)、<math>T_m</math> は融雪温度(<math>^{\circ}C</math>)、<math>r_m</math> は日融雪量(<math>mm / d</math>)、<math>m</math> は積雪定数(-)、<math>P</math> は日降水量(<math>mm / d</math>)、<math>h</math> は融雪を考慮した後の積雪深(<math>mm</math>)、<math>h_p</math> は前日までの積雪深(<math>mm</math>)、<math>P_m</math> は融雪量を含めた日降水量(<math>mm / d</math>)を示す。</p>
	蒸発散	<p>本検討は、気温と可照時間のみから蒸発散量を推定可能なハーモン法を用いる。</p> <p>使用する気温データは、7~31地点(時期により異なる)の地上観測データを時間、空間的に内挿補間を行ったデータを用いた。</p> <p>なお、ハーモン法による可能蒸発散量は以下の諸式を用いて算定される。</p> $E_p = 0.14 D_0^2 p_t$ <p>ここで、<math>E_p</math> は日平均蒸発散量(<math>mm/d</math>)、<math>D_0</math> は12時間を1に規格化した可照時間(-)、</p>

地下水流動

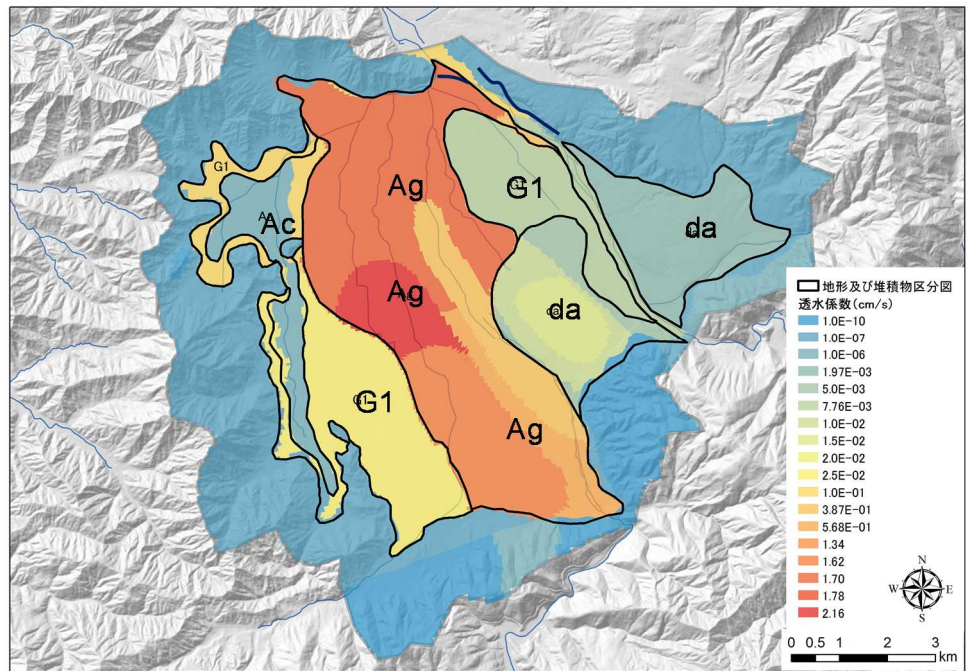


図 透水性係数等一覧

河川・  
河川と地下水  
の水交換

●河川流出

土地利用に対応付けた等価粗度、表層土壌および地下地質の透水係数、有効間隙率等の調整・検討を行い、実測された河川流量を適切に再現するパラメータを同定した。これらのパラメータは、既往文献等に示される一般的な幅の範囲で調整し確定した。

●地下浸透

地表面を通過する水量（地上から地下への浸透量、地下から地上への湧出量）を算出する。これらの水量は実測が難しいため、上述した等価粗度、透水係数、有効間隙率等の調整・検討を繰り返し行い、複数地点の河川流量、地下水位等を適切に再現するよう算出した。

土地利用は 100mメッシュ土地利用区分を用い、領域内の等価粗度係数の空間分布に反映した。具体的には、土地利用区分毎に定められる等価粗度係数を用い、計算格子の各メッシュに含まれる土地利用区分の面積で按分した粗度係数を算出し割り当てた。

表 年代毎の土地利用区分の等価粗度

昭和 51 年	昭和 62 年	平成 9 年	平成 18 年	等価粗度 ( $m^{-1/3} \cdot s$ )
田	田	田	田	0.6
畑	畑	その他の農用地	その他の農用地	0.2
果樹園	果樹園			0.2
その他樹木畑	その他樹木畑			0.2
森林	森林	森林	森林	0.4
荒地	荒地	荒地	荒地	0.1
建物用地 A	建物用地	建物用地	建物用地	0.05
建物用地 B				0.05
幹線交用地	幹線交用地	幹線交用地	道路	0.05
			鉄道	
その他の用地	その他の用地	その他の用地	その他の用地	0.1
湖沼・河川	内水地・河川	河川地及び湖沼	河川地及び湖沼	0.035
その他	その他	その他	その他	0.1

表 水田面積の設定で参考にした資料

管理者	資料名		出典等
大野市	平成 23 年度 大野市「大野市地下水シミュレーションモデル 修正業務委託【湧水第 1 号】報告書」	水田面積割合メッシュデータ	大野市

地下水揚水

●河川取水

河川取水については、発電所、水道及び農業用の水利用について考慮した。発電所については、取水口より実測データに基づき河川水を取水し、排水口地点からの排水を考慮した。下五条方堰からの農業用水、発電用取水を施設管理者の資料に基づき設定した。

●地下水揚水

地下水揚水については、上水道、簡易水道、工業用水、農業用水、温泉取水を考慮した。



解析結果

チューニング  
(モデルの改良)

平成 25 年度に構築した大野盆地水循環解析モデルの再現性を高めるために、平成 26 年度に、4つの項目について再チューニングを行った。

●木瓜川等の河道形状の変更

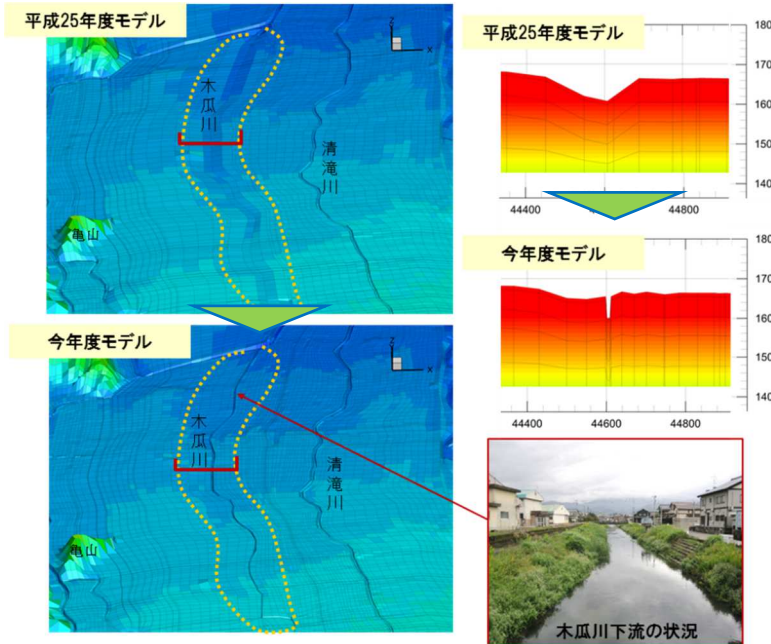
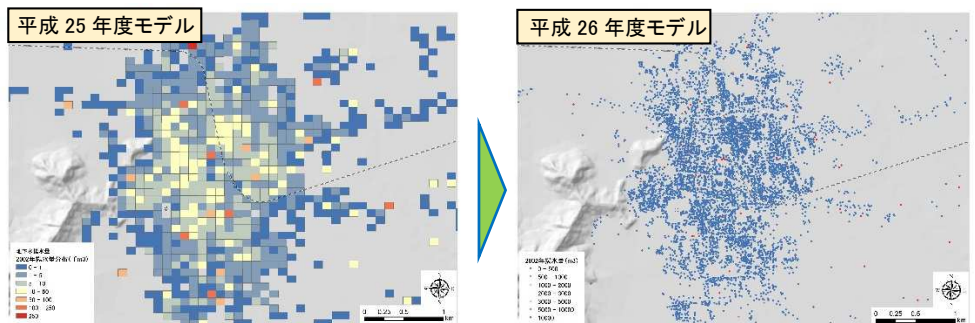


図 木瓜川の河道形状の修正

●地下水採取量の再設定

平成 25 年度は、経年的に整理された大野盆地全体の年揚水量データと、既往資料である単年度に整理された 100mメッシュの年地下水揚水量データを用いて、経月的な揚水量のメッシュデータを作成した。また、地下水採取量は Ag 層と G1 層を同量に設定した。

平成 26 年度は、入手した大野市資料に基づき、井戸毎の月地下水採取量と地下水採取深のデータを用いて、経月的な揚水量の分散データを作成した。



平成 25 年度は、2002 年の年揚水量に対する他年の年揚水量の割合を、資料の 2002 年の 100mメッシュ年揚水量データに掛けて、他年の 100mメッシュ年揚水量データを作成した。次に、年揚水量に対する毎月の揚水量の割合を 100メッシュ年揚水量データに掛けて、100mメッシュ月揚水量データを作成。

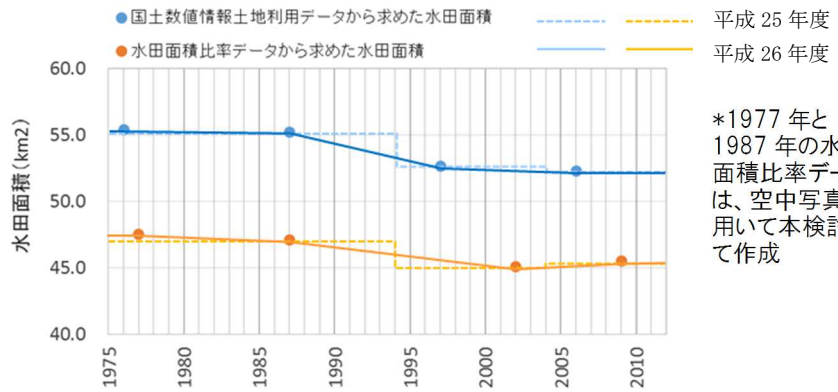
平成 26 年度は、井戸毎の月地下水揚水量データを利用。井戸の位置に、地下水揚水量と地下水採取深を設定。

図 地下水揚水データ

チューニング  
(モデルの改良)

●水田面積の再設定

平成 26 年度は、水田面積は、国土数値情報における水田に区分される水田面積と、既往資料<sup>1</sup>におけるメッシュ別の水田面積比率を用いて、水田の実面積を算出した。



\*1977 年と  
1987 年の水田  
面積比率データ  
は、空中写真を  
用いて本検討に  
て作成

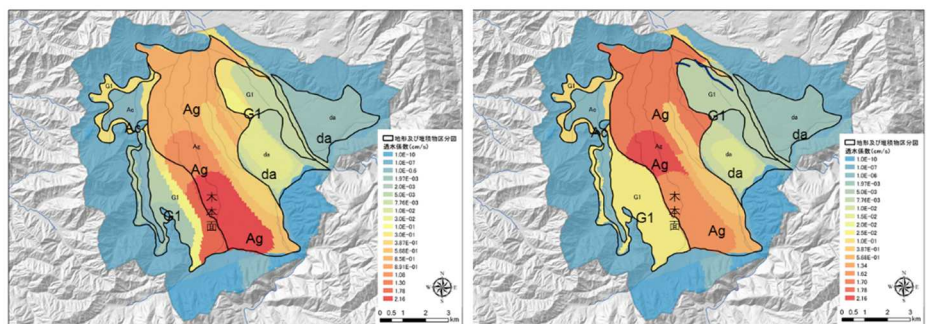
図 水田面積の割合

●地層の透水係数の再設定

平成 25 年度は、地下水位の一斉観測データの再現性を高めることを目的として地層の透水係数の設定を行った。そのため、地層区分と透水係数区分が一致しないところ(木本面付近)が生じた。

平成 26 年度は、地層区分と整合した透水係数の設定を行った。さらに、地下水位の常時観測データの再現性を高めることを目的として試算計算を繰り返し、地層区分内で透水係数のゾーンを細区分した。

その結果、平成 26 年度の Ag 層の透水係数の区分は、平成 25 年度の透水係数の区分に対し、盆地中央部付近と盆地北部のほうが大きい値となった。



平成 25 年度

平成 26 年度

図 透水係数の設定

解析結果

地下水位

地下水位は、経年の地下水位の高さ、季節変動、経年変動は、大野盆地の市街地及びその周辺のほとんどの地下水観測井において再現性が向上し、引き続き高い再現性を示した。

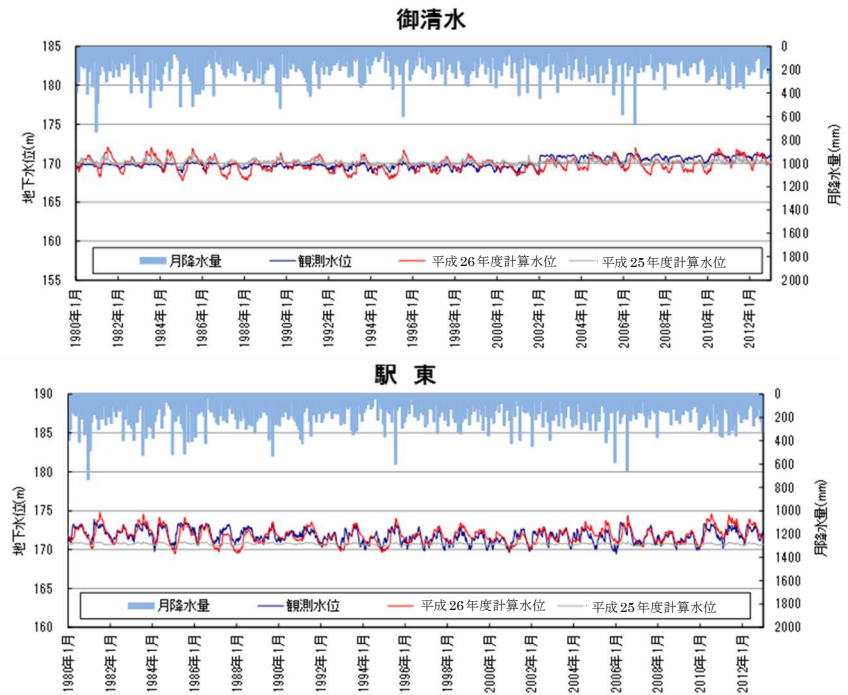


図 観測地下水位と計算地下水位

河川流量

麻生島観測所における 1983 年から 1988 年の観測河川流量と計算河川流量は、良く整合する結果となった。

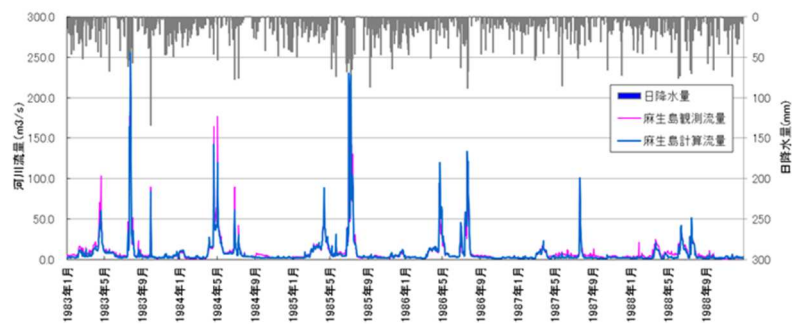


図 観測河川流量と計算河川流量

水循環解析結果を用いて、大野盆地の水収支を近10年間平均値として求めた。水収支の集計範囲は、未固結堆積層（Ag層、G1層など）が堆積する範囲とした。

水収支

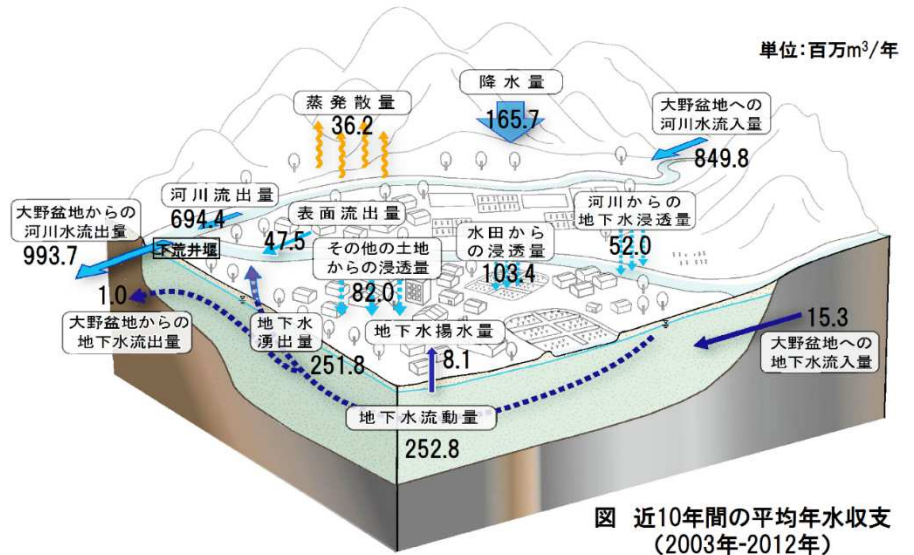


図 水収支

解析結果

水循環解析結果を用いて、地下水の流線軌跡図を作成した。地下水流線軌跡図は、300mメッシュの中央に配した粒子が、当該日の地下水圧分布の定常状態において移動する経路を記したものである。

2012年1月の流線軌跡図では、西に大きく湾曲しながら、清滝川・木瓜川に沿って流下する系統、真名川に沿ってやや西に傾きながら北流する系統、九頭竜川に向けて西流する系統にわかれる。何れの系統も、下荒井堰直上流部で地表水に合流している。

地下水流線軌跡図

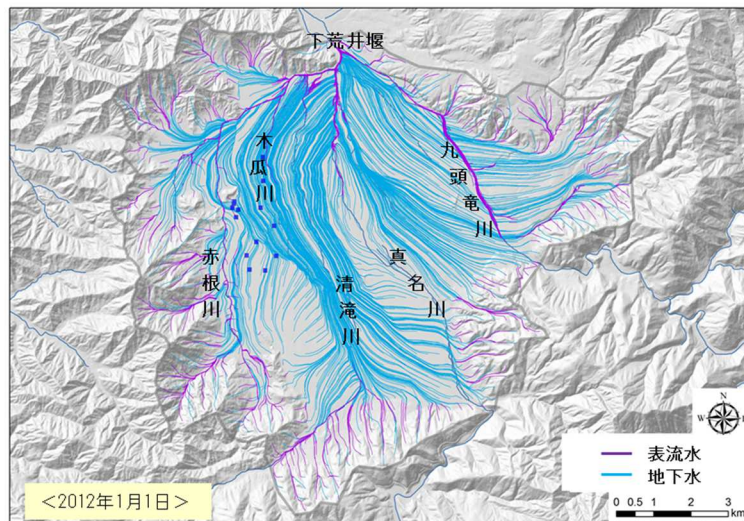


図 地下水流線軌跡図

## 2) 参考文献

- 1) 西村宗倫・川崎将生 (2015) : 福井県大野盆地における水循環解析、日本地下水学会2015年度秋季講演会講演予稿集、108-113.
- 2) 西村宗倫・川崎将生 (2013) : 千代川流域を対象とした地下水の長期解析、日本地下水学会2013年度春季講演会講演予稿集、26-31.
- 3) 例えば、登坂博行 (2006) : 地圏水循環の数理 流域水環境の解析法、(財) 東京大学出版会
- 4) 登坂博行・小島桂二・三木章生・千野剛司 (1996) : 地表流と地下水流を結合した3次元陸水シミュレーション手法の開発、地下水学会誌、38 (4)、253-267.
- 5) 例えば、斉藤 泰久・鈴木 章浩・伊藤 覚 (2006) : 準三次元地下水浸透流解析モデルを応用した分布型水循環モデル(WCAP)の構築、土木学会論文集B、Vol. 62(2006) No. 1、1-15.
- 6) 例えば、日本地下水学会 (2010) : 地下水シミュレーションーこれだけは知っておきたい基礎理論ー、技報堂出版(株)
- 7) 西村宗倫・川崎将生・斉藤泰久・橋本 健志 (2016) : 福井県大野盆地における水循環解析、地下水学会誌へ論文投稿中.

---

国土技術政策総合研究所研究報告

RESEARCH REPORT of N I L I M

N o . 8 8 3                      March 2016

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは   （事務局課・電話）

〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地

企画部研究評価・推進課   TEL 029-864-2675